tijdschrift van het

nederlands elektronica- en radiogenootschap

deel 40 - nr. 4 - 1975

nederlands elektronica- en radiogenootschap

Nederlands Electronica- en Radiogenootschap
Postbus 39, Leidschendam. Gironummer 94746 t.n.v.
Penningmeester NERG, Leidschendam.

HET GENOOTSCHAP

Het Genootschap stelt zich ten doel in Nederland en de Overzeese Rijksdelen de wetenschappelijke ontwikkeling en de toepassing van de elektronica en de radio in de ruimste zin te bevorderen.

Lidmaatschap

Voor lidmaatschap wende men zich tot de secretaris. Het lidmaatschap staat -behoudens ballotage- open voor academisch gegradueerden en hen, wier kennis of ervaring naar het oordeel van het bestuur een vruchtbaar lidmaatschap mogelijk maakt.

Studenten aan universiteiten en hogescholen komen bij gevorderde studie in aanmerking voor een junior-lidmaatschap, waarbij 50% reductie wordt verleend op de contributie. Op aanvraag kan deze reductie ook aan anderen worden verleend.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt zesmaal per jaar. Opgenomen worden artikelen op het gebied van de elektronica en van de telecommunicatie.

Auteurs die publicatie van hun wetenschappelijk werk in het tijdschrift wensen, wordt verzocht in een vroeg stadium kontakt op te nemen met de voorzitter van de redactie commissie.

De teksten moeten, getypt op door de redactie verstrekte tekstbladen, geheel persklaar voor de offsetdruk worden ingezonden.

De abonnementsprijs van het tijdschrift bedraagt f 40,--. Aan leden wordt het tijdschrift kosteloos toegestuurd.

Tarieven en verdere inlichtingen over advertenties worden op aanvrage verstrekt door de voorzitter van de redactiecommissie.

DE EXAMENS

De examens door het Genootschap ingesteld en afgenomen zijn:

a. op lager technisch niveau:"Elektronica monteur NERG"
b. op middelbaar technisch niveau: Middelbaar Elektronica Technicus NERG"
c. voor het oude examen "Elektronica Technicus NERG" kan volgens de beeindigingsregeling nog slechts tot en met 1975 worden ingeschreven.

Brochures waarin de exameneisen en het examenreglement zijn opgenomen kunnen schriftelijk worden aangevraagd bij de Administratie van de Examencommissie.

Voor deelname en inlichtingen wende men zich tot de Administratie van de Examencommissie NERG, Genemuidenstraat 279, den Haag, gironummer 6322 te den Haag.

WELKE NIEUWE MOGELIJKHEDEN GEEFT DE IC-TECHNOLOGIE AAN DE ANALOGE ELEKTRONIKA

Ir. Th.J. van Kessel
Philips Natuurkundig Laboratorium

IC-technology has played a part in electronics for about a decade. Starting from the experience gained and from the new possibilities offered at present an attempt can be made to predict how IC-technology will influence analog electronics of to morrow.

INLEIDING

Het is nu tien jaar geleden dat het boek "Integrated Circuits", een samenvatting van een IC cursus van Motorola, verscheen. Dit boek was voor velen de eerste kennismaking met de monolithische integratie.

Het was ook in 1965 dat de eerste operationele versterkers, de µA 702 en µA 709, ontworpen door Bob Widlar, door Fairchild op de markt gebracht werden. Een IC-geschiedenis van tien jaar ligt achter ons.

Een sprong van nog eens tien jaar terug brengt ons in een andere belangrijke fase van de analoge electronica. Men werd zich bewust dat de toenmalige electronische componenten zoals buizen tot modules konden worden samengebouwd en dat deze modules universeel toepasbaar bleven, zij het op meer specialistische terreinen.

George Philbrick trok de consequentie van deze gedachte en bracht een complete set instrumentele modules op de markt. De eerste operationele versterkers, al dan niet choppergestabiliseerd, vermenigvuldigers, logversterkers en functiegeneratoren verschenen. De prijs van deze modules was echter wel zodanig, dat men deze niet als componenten verbruikte, maar samengebouwd to analoge rekenunits met name in de regeltechniek gebruikte.

De eerste ideeën omtrent modulaire opbouw ontsproten dus een kwart eeuw geleden.

INTEGRATIE

In de beginperiode van monolithische integratie was reeds direct duidelijk, dat dit de methode voor de massafabricage van electronische schakelingen zou worden. De aanloopkosten zijn weliswaar hoog maar deze worden bij grote series identieke circuits mede door de lage productiekosten volledig gecompenseerd.

De gewenste grote series treft men aan in de digitale techniek en in analoge systemen zoals radio en TV. Zo vond de integratie in deze richting zijn weg. In de instrumentele electronica vormden vooral de modules zoals operationele versterkers het toepassingsgebied voor de integratie. De IC-techniek heeft deze modules tot componenten gemaakt die vanwege de lage prijs nu verbruikt kunnen worden.

In de aanloopfase van de integratie bestond de opvatting, dat door de beperktheid in de mogelijkheden van de nieuwe technologie, de kwaliteit van de aldus verkregen producten duidelijk minder zou zijn. De restrictie in weerstandswaarden, het ontbreken van grote capaciteiten, de slechte eigenschappen van de PNP-transistoren en de parasieten werden als reden hiervoor aangewezen.

Het is de verdienste van de electronici geweest, dat zij als antwoord op de aangeboden technologie een electronica ontworpen hebben, waarbij de voordelen van de IC-techniek, zoals de onderlinge gelijkheid van de transistoren, volledig benut en de nadelen omzeild worden. Deze electronica, die gebaseerd is op o.a. verschilversterkers, stroomspiegels en spannings-

stabilisatie wordt nader toegelicht in de bijdrage van ir. K.E. Kuijk : "Het ontwerpen van analoge IC's met behulp van basisschakelingen". Deze nieuwe electronica heeft duidelijk tot kwaliteitsverbetering van de IC's geleid.

Een ander aangevoerd bezwaar als zou de betrouwbaarheid van de schakelingen afnemen naarmate men meer componenten gebruikt, -hetgeen bij modulaire opbouw het geval is-, blijkt ongegrond. De betrouwbaarheid van IC's blijkt slechts in geringe mate afhankelijk te zijn van het aantal componenten en grotendeels bepaald te worden door het aantal technologische stappen in het productie proces en het aantal aansluitpunten. Het tegengestelde van dit bezwaar mag men dus stellen. Integratie betekent door de verhoging van de betrouwbaarheid een wezenlijke stap in de richting van grote systemen.

Toch moet men niet menen, dat de monolithische integratie een oplossing voor alles is. In sommige gevallen geven hybride circuits betere resultaten vooral wanneer de combinatie van componenten zoals field effect en bipolaire transistoren een bepalende rol spelen. In het hieronder gegeven overzicht van analoge bouwstenen is dit aangeduid. De bouwstenen zijn in vier functionele groepen ingedeeld; versterken, bewerken, omzetten en genereren. Een I geeft aan dat integratie tot goede resultaten leidt, een H betekent dat aan een hybride vorm de voorkeur gegeven moet worden.

Versterken	Bewerken
Op amps:	
bipolair LF (I)	Vergelijken (I)
" HF (I,H)	Vermenigv. (I)
FET-ingang (I,H)	Delen (I)
Electrometer (H)	Log. (I,H)
Chopper stab. (H)	RMS (I,H)
Instrumentatie verst. (I, H)	

Omzetten	Genereren
Moduleren (I,H)	spannings ref.(I,H)
DAC LF (I,H)	stabilisatie (I,H)
HF (H)	
ADC LF (I,H)	VCO (I,H)
HF (H)	

Dit overzicht laat zien dat nog lang niet voor alle modules integratie de optimale fabricage methode is.

DE KOMENDE JAREN

Het overzicht geeft enigszins de huidige stand van de techniek rond de bouwstenen van de analoge electronica. Zeker is dat deze stand niet zo zal blijven door het aanbod van nieuwe technologische mogelijkheden. De vraag blijft dus in welke richtingen de ontwikkeling van de electronica zal verlopen. Zeker drie richtingen kan men onderscheiden:

- Nieuwe technologieën
- Configuratie electronica
- "Large scale" integratie (LSI)

Welke betekenis deze drie richtingen voor de electronica zullen hebben, zal in de volgende hoofdstukken duidelijk gemaakt worden.

NIEUWE TECHNOLOGIEEN

Momenteel worden een aantal nieuwe technologieën operationeel, waarvan men kan verwachten, dat hierdoor een aantal beperkingen, die in de huidige IC's bepalend zijn, zullen worden opgeheven.

Zo zullen nieuwe isolatie technieken, zoals luchtisolatie, de p-kanaal isolatie vervangen, waardoor de aanwezige parasitaire capaciteiten verkleind worden en de schakelingen een beter HF gedrag zullen vertonen.

Ionenimplantatie geeft de mogelijkheid verontreinigingen ook in lage concentraties nauwkeurig gedoseerd aan te brengen. Door deze implantatietechniek verwacht men betere onderlinge gelijkheid van transistoren en weerstanden te kunnen realiseren, waardoor o.a. laddernetwerken voor DAC's integreerbaar worden. Ook aan de combinatie FET-bipolair in één IC valt nu te denken.

Processen, zoals LOC-MOS (C-MOS), die ten behoeve van digitale circuits zijn ontwikkeld kunnen misschien aangewend worden op nieuwe terreinen. De LOC-MOS structuur is in figuur 1 aangegeven. Het proces biedt tegelijkertijd enhancement P- en N-kanaal MOS-transistoren. Het is niet ondenkbaar dat ook hiermee analoge schakelingen overeenkomstig de bipolaire IC-electronica kunnen worden opgebouwd. De goede schakelaar-eigenschappen van de MOS-transistoren maken deze zeker bruikbaar in ADC- en DAC-circuits.

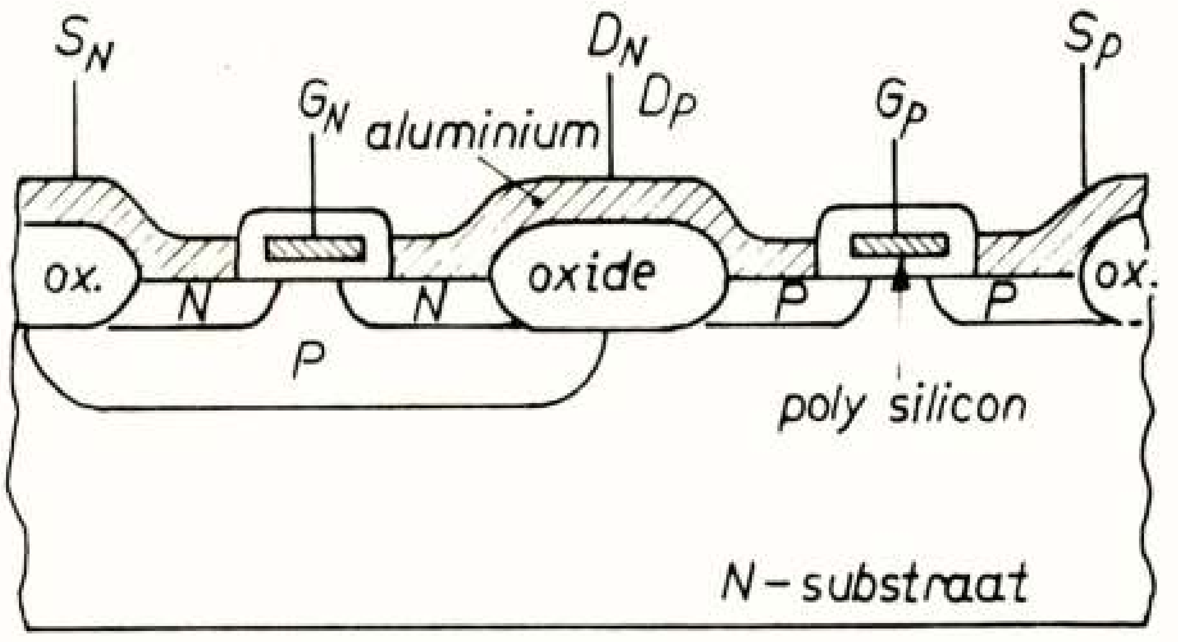


Fig. 1. LOC-MOS-structuur

Het is zeker dat door de nieuwe technologieën in de komende jaren een aantal "H's" in het gegeven overzicht door "I's" vervangen kunnen worden Hierdoor zal de prijs verlaagd en het toepassingsgebied verbreed worden.

CONFIGURATIE ELECTRONICA

Onder configuratie electronica verstaat men een geïntegreerde electronica waarbij men de componenten niet meer als zodanig in het IC kan onderscheiden. Een voorbeeld hiervan is de reductie van een weerstandsladder netwerk tot een weerstandsstrip met aftakpunten. De relatieve verhouding tussen de grootte van de contacten en de onderlinge afstand zal de nauwkeurigheid van het laddernetwerk bepalen.

Een tweede voorbeeld van configuratie electronica is de overgang van "emmertjes"-geheugens naar "charge coupled devices" (CCD).

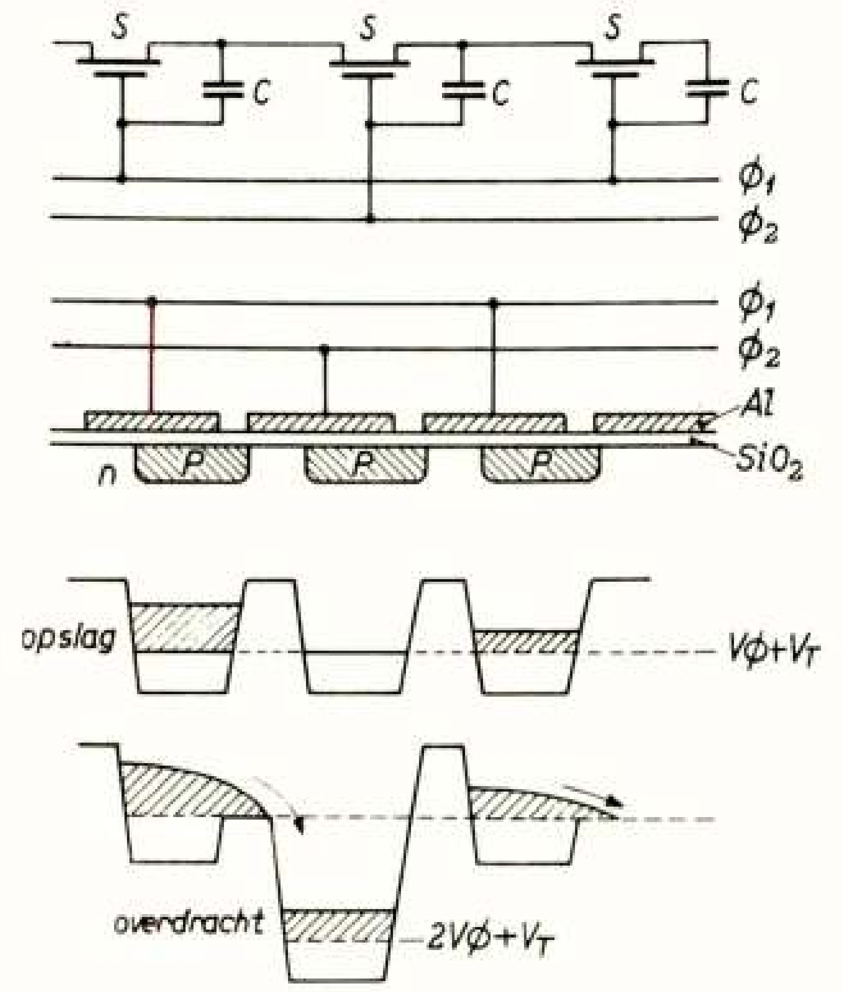


Fig. 2. Emmertjesgeheugen.

In figuur 2 is de opbouw van een emmertjesgeheugen weergegeven. De discrete schakelaars en capaciteiten zijn in het IC als P-kanaal MOS-transistoren en als Aluminium-P laag capaciteiten te onderscheiden. De werking van het schuifgeheugen berust op het afwisselend overgieten van lading van een emmertje in het volgende.

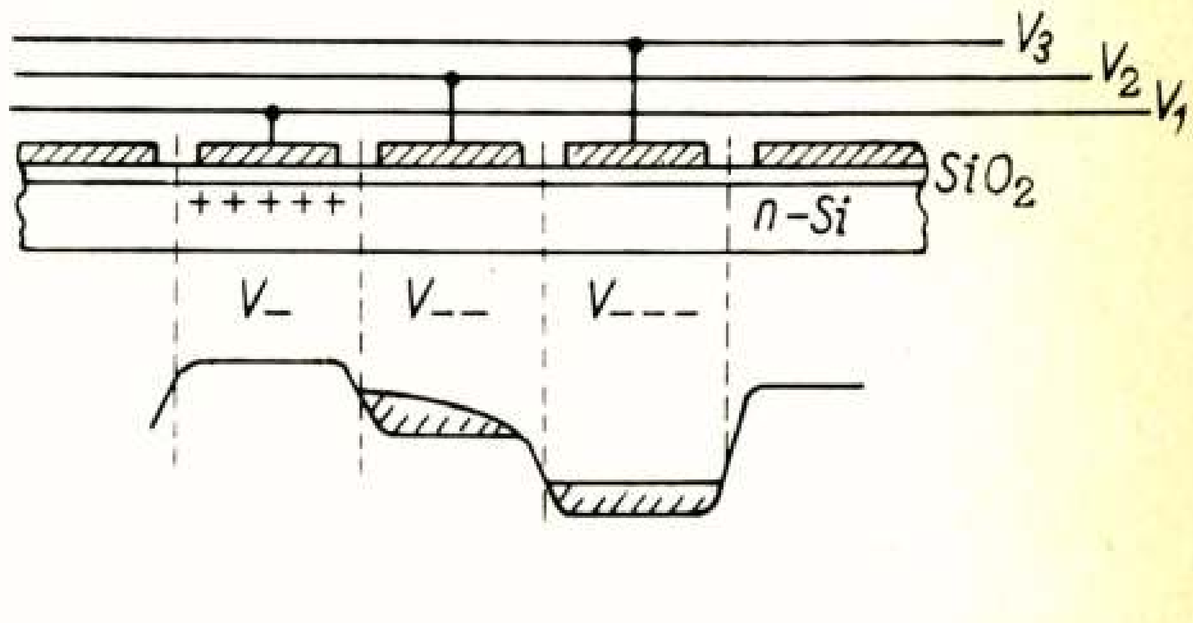


Fig. 3. CCD-schuifgeheugen.

Een CCD-schuifgeheugen is in figuur 3 weergegeven. De discrete onderdelen zijn nu verdwenen. De lading wordt door spanningen op de electrodes vastgehouden en doorgeschoven door variatie in deze spanningen.

Ook injectielogica (I^2L) kan in vergelijking met gewone TTL als een vorm van configuratie electronica beschouwen.

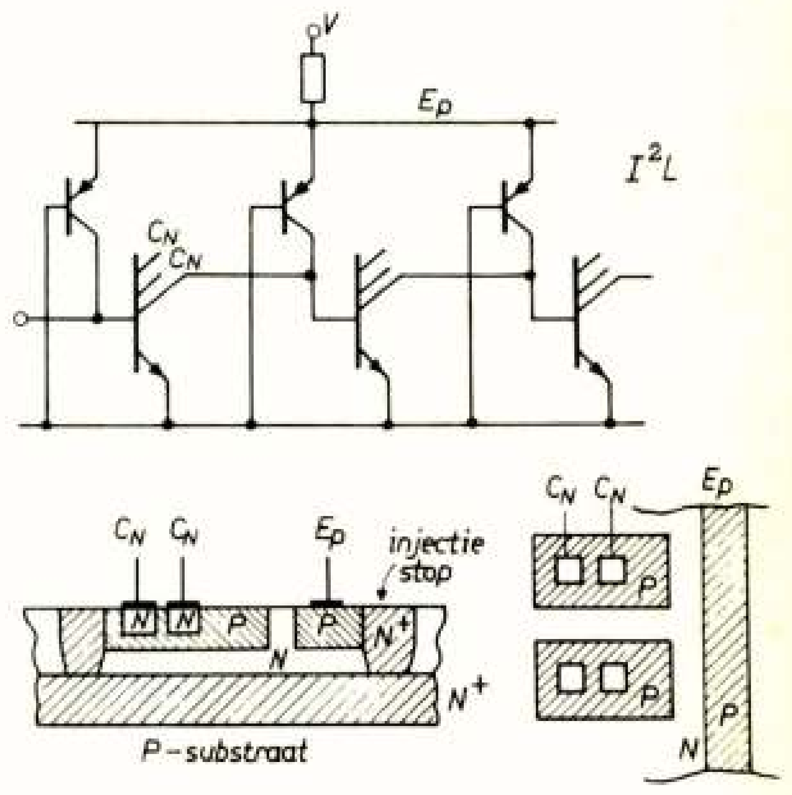


Fig. 4. Injectielogica.

Het principe van deze logica wordt in fig. 4 weergegeven. de PNP-collectorstromen worden of via de collectoren van de linker NPN-transistoren afgeleid of zij openen de rechter transistoren. Op deze wijze kan men logische schakelingen opbouwen. De configuratie van deze PNP-stroombronnen is nu niet discreet

gekozen. Een balkvormige P-N-diode fungeert als een gemeenschappelijke emitter, als een injector, voor alle NPN transistoren, die discreet t.o.v. deze balk staan opgesteld.

Deze voorbeelden rechtvaardigen het vermoeden, dat nog meer electronische functies via een configuratiekeuze gerealiseerd zullen kunnen worden.

LARGE SCALE INTEGRATIE

De integratie zal in de komende jaren ook de mogelijkheid geven meer componenten in een circuit onder te brengen. Deze toename van componenten zal gepaard gaan met een groei in complexiteit van de schakeling. In veel gevallen zal dit een specialisatiebetekenen met als gevolg dat het toepassingsgebied van het circuit zal inkrimpen en derhalve de seriegrootte zal afnemen.

In het voorgaande is reeds aangevoerd, dat juist bij integratie de seriegrootte van belang is om de hoge aanloopkosten te kunnen compenseren. Bij de integratie van grote circuits blijkt echter ook nog dat de opbrengst en de betrouwbaarheid van de schakelingen toeneemt naarmate men meer ervaring met het circuit heeft. Grote series, identieke schakelingen zijn dus ook bij large-scale integratie zeer wenselijk.

MODULARITEIT

Men kan zich voorstellen dat als reactie op de problemen rond de seriegrootte bij large-scale integratie veel fabrikanten de neiging hebben specialistische "klantencircuits" af te stoten. Zij prefereren duidelijk standaardcircuits zoals microprocessors, geheugens en programmeerbare logische arrays. De seriegrootte wordt niet door specialisatie beperkt omdat de klanten immers hun wensen via software kunnen realiseren.

Dergelijke software oplossingen zullen zeker niet altijd voldoen en de vraag naar "klanten-IC's" zal derhalve blijven bestaan. Als antwoord hierop zijn bij veel firma's ontwerpsystemen voor digitale circuits ontwikkeld. Met behulp van computerprogramma's kan men volledig genormeerde digitale ontwerpen genereren en controleren. Hierbij gaat men niet meer alleen uit van basiselementen als nands en nors maar ook van complexe functies, die men als eenheid via de computer kan oproepen. Op deze wijze is men in staat overeenkomstig de wensen van de klant grote digitale circuits met een hoge opbrengst en kwaliteit te produceren.

Bij het ontwerpen van grote analoge schakelingen wordt men in sterkere mate geconfronteerd met de reeds genoemde problemen. Analoge circuits hebben onderling weinig gemeen en binnen een enkele schakeling komen zelden zich herhalende patronen voor zoals bijv. het geval is bij schuifregisters en geheugens. Het ontwerpen van een lay-out voor een analoog circuit is daarom moeilijk voor automatisering toegankelijk te maken. Toch kan de electronicus de automatisering bevorderen door te proberen verschillende schakelingen uit een aantal deelcircuits op te bouwen. Een poging in deze richting wordt geïllustreerd in de figuren 5 t/m 9. De bruikbaarheid van de spanning-stroom omzetter als deelcircuit wordt hierin aangetoond.

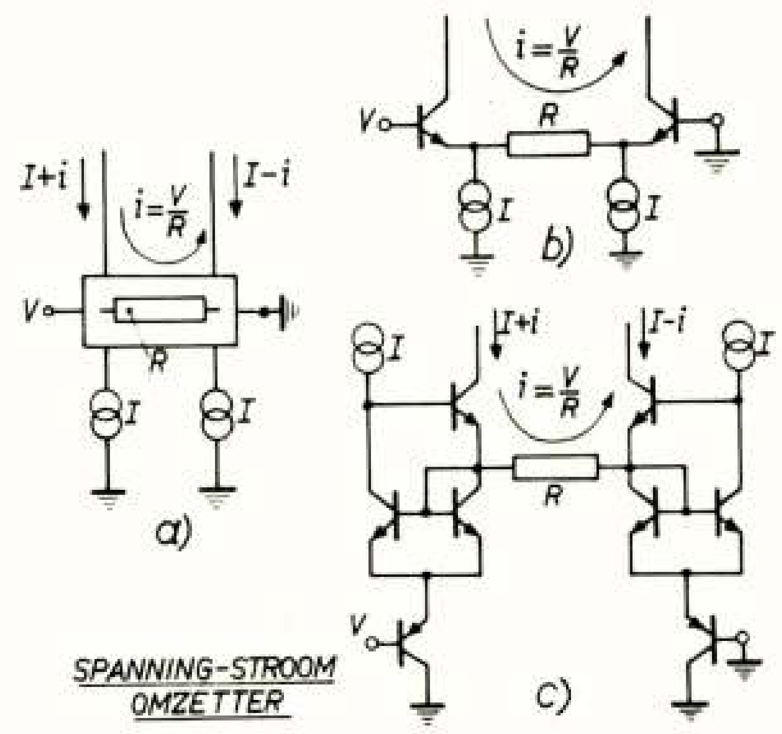


Fig. 5.

Het principe van de omzetter wordt in fig. 5 aangegeven. De meest eenvoudige vorm (b) bestaat uit een tegengekoppelde verschil versterker. De omzetnauwkeurigheid wordt bepaald door de verhouding van de weerstand R t.o.v. de uitgangsimpedantie van de emitters ($1/S$). Toevoeging van stroomspiegels in een verbeterde versie (c) verhoogt de nauwkeurigheid met de helft van de stroomversterkingsfactor β.

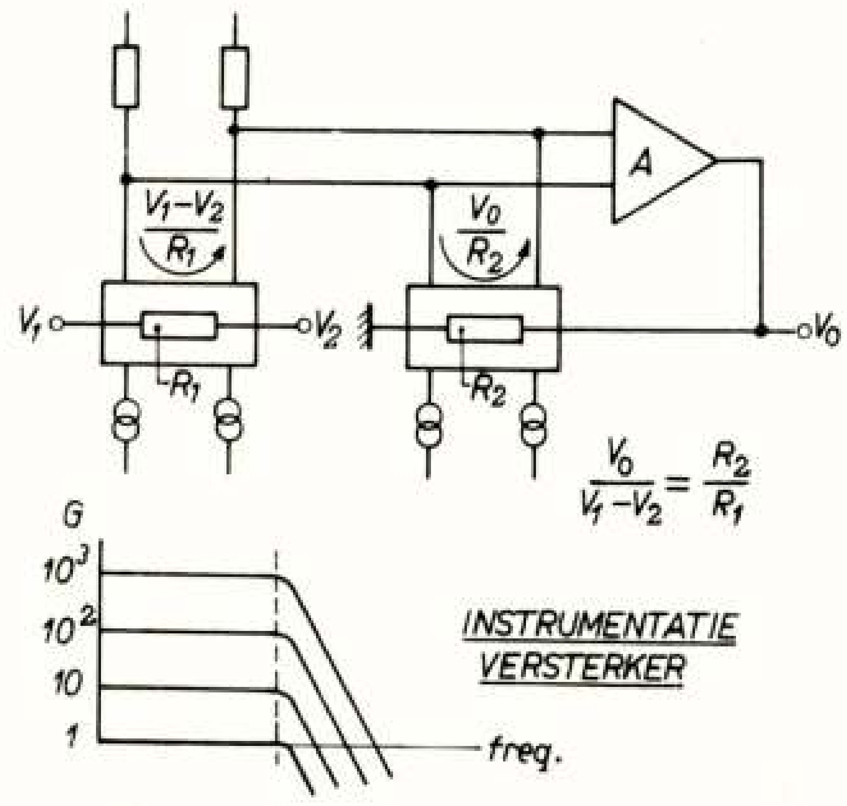


Fig. 6.

Het principe van een instrumentatie versterker als een eerste voorbeeld van de toepassing van spanningstroom omzetters wordt in fig. 6 aangegeven. De collector-verschilstroom $\frac{V_1 - V_2}{R_1}$ van de ingangs-omzetter wordt m.b.v. een versterker en een uitgangsomzetter gecompenseerd met een verschilstroom $\frac{V_O}{R_2}$. De versterking van de gehele schakeling wordt dus bepaald door de verhouding R_2/R_1 en kan door de keuze van R_1 ingesteld worden. Omdat R_1 niet ingrijpt in de regellus, bestaande uit de versterker en de uitgangsomzetter, is de bandbreedte van deze instrumentatie versterker onafhankelijk van de gekozen versterking.

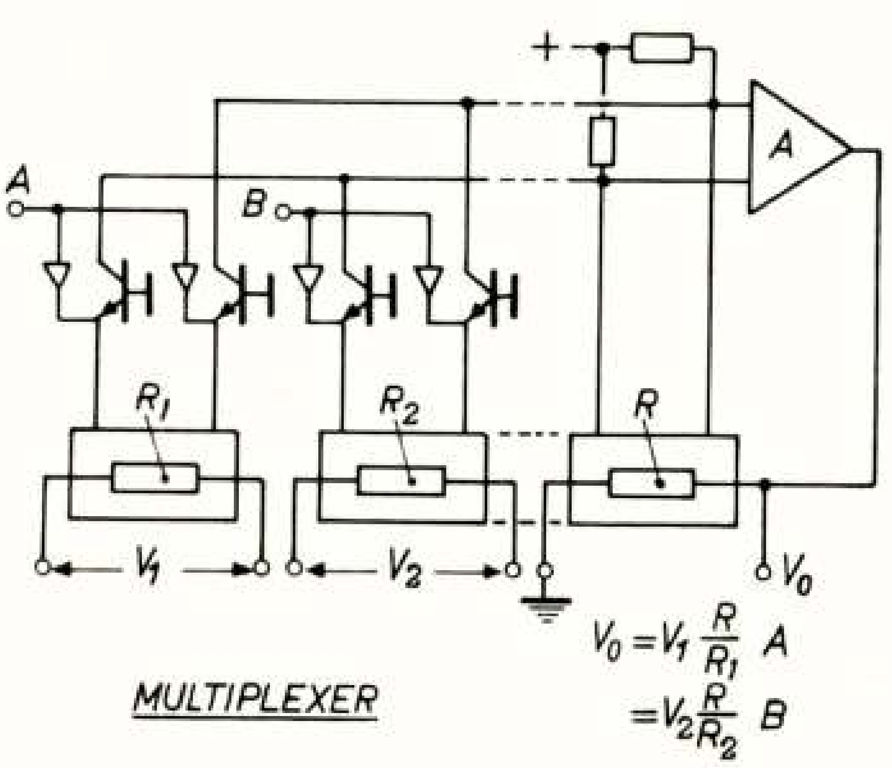


Fig. 7.

Een uitbreiding van deze instrumentatie versterker tot multiplexer wordt in fig. 7 geïllustreerd. Een aantal ingangs-omzetters worden met een uitgangsregellus gecombineerd. Door de ingangsomzetters afwisselend te schakelen verkrijgt men een multiplexer met in te stellen kanaalversterking.

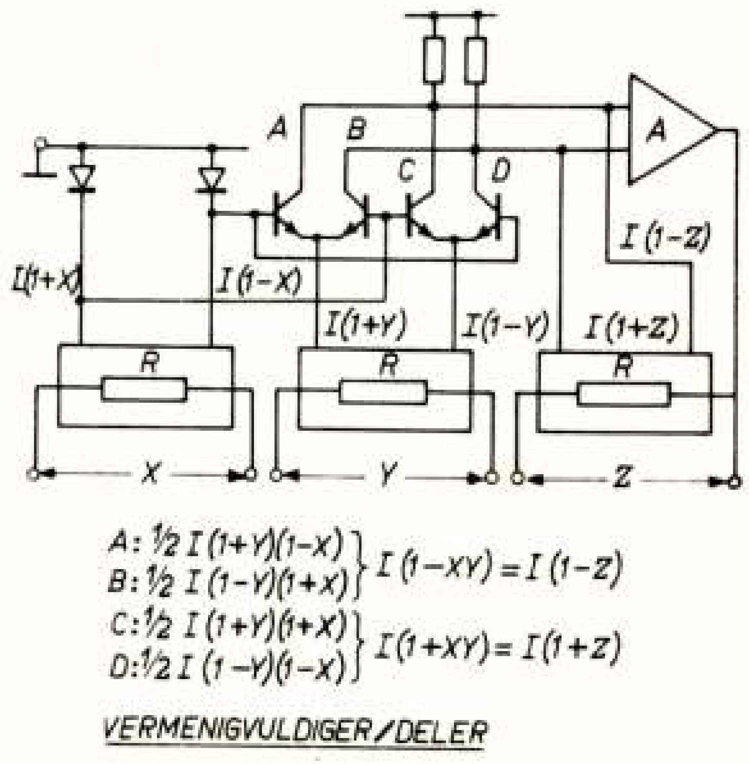


Fig. 8.

Een vermenigvuldiger/deler wordt verkregen door een uitgangsregellus te combineren met twee ingangsomzetters. De ingangsomzetter (x) creëert een verschilspanning tussen de diodes, $\Delta \text{VBE} = \frac{kT}{q} \ln \frac{1+x}{1-x}$. Deze spanning wordt gedrukt op de ingangen van de verschilversterkers, die gekoppeld zijn aan de omzetter (y). Hierdoor wordt een verdeling van de collectorstromen verkregen zoals in fig. 8 is aangegeven. Deze stromen worden door de regellus gecompenseerd met als resultaat $z = xy$. Delen wordt gerealiseerd door de uitgang van versterker A op omzetter x of y aan te sluiten en de omzetter (z) als ingang te benutten.

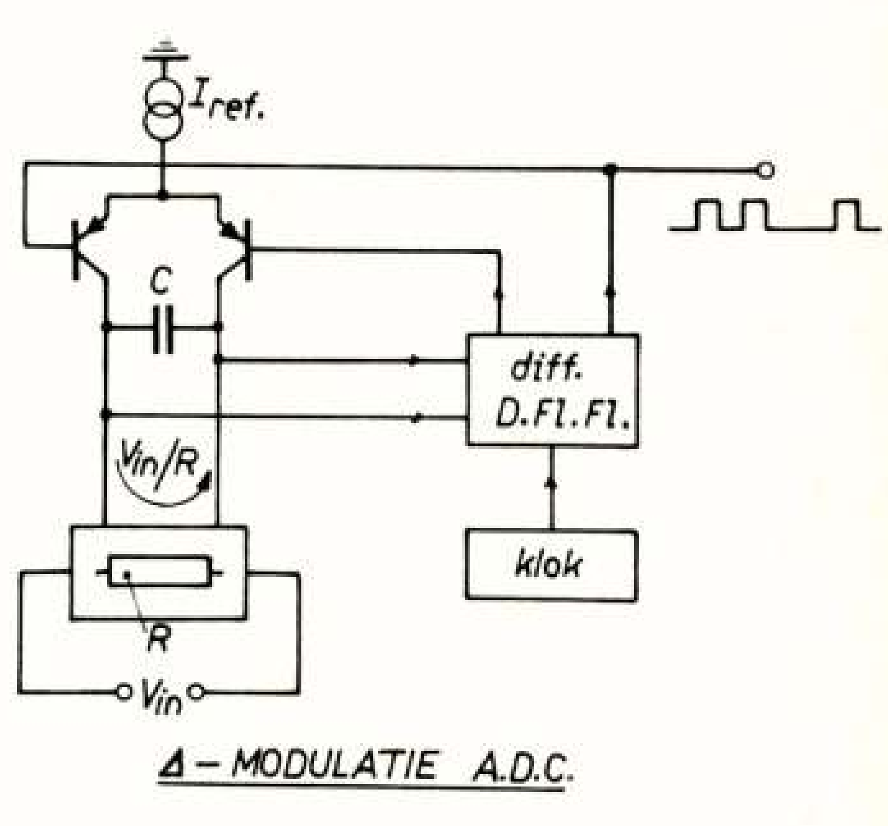


Fig. 9.

Door niet continu maar discontinu de collectorstromen van een omzetter via een regellus te compenseren, verkrijgt men een analoog-digitaal omzetter gebaseerd op delta-

modulatie (fig. 9). De spanning over de capaciteit c, die wordt opgebouwd door de collectorstromen van de omzetter, wordt nul geregeld door de referentiestroom geklokt links of rechts naar de capaciteit toe te voeren. Het aldus verkregen schakelpatroon geeft een informatie over de grootte van de verschilstroom en dus over V_{in}.

Deze voorbeelden illustreren, dat door een ontwerpkeuze ook een zekere modulariteit in de analoge LSI kan worden toegepast.

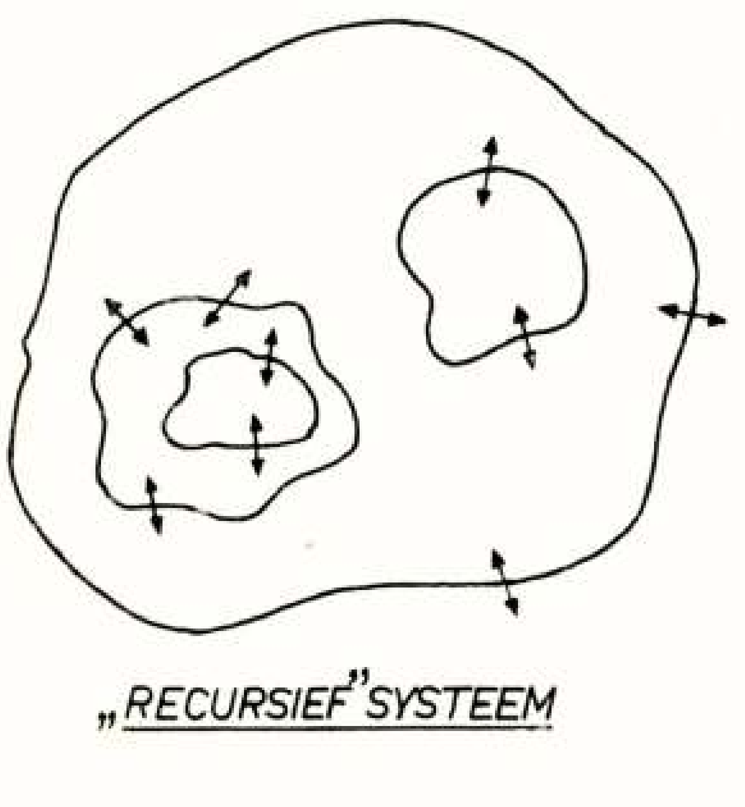
RECURSIVITEIT

In het voorgaande hebben we gezien, dat problemen rond de grootte van de schakeling, de complexiteit en de specialisatie opgelost moeten worden wil de large-scale integratie succesvol worden. Daarnaast bestaat de vraag of de toename in complexiteit zijn grens zal vinden door het verlies aan overzicht voor de gebruikers. Ook kan men zich afvragen of de mogelijke toename gekoppeld is aan de keuze van digitale of analoge signaalverwerking. Zeker is dat bij systeemgroei de bruikbaarheid niet zonder meer behouden blijft.

Een mogelijke benadering van dit probleem is, na te gaan of men systemen niet zodanig kan opbouwen, dat men, het systeem ontrafelend, steeds dezelfde grondpatronen aantreft. Dit principe,afkomstig uit de informatietheorie,wordt met recursiviteit aangeduid.

Recursiviteit

Een recursief systeem bestaat uit onafhankelijke delen en is zelf een onafhankelijk deel van een groter recursief systeem.



„RECURSIEF" SYSTEEM

Fig. 10.

In fig. 10 is een recursief systeem zeer schematisch weergegeven. De pijlen duiden op de communicatie tussen de recursieve systemen van verschillende orde.

Het begrip recursief wordt duidelijker door een aantal eigenschappen van deze onafhankelijkheid te onderscheiden.

Beslissingsvaardigheid. Een recursief systeem kan de onzekerheden in de inkomende informatie onderkennen en op zijn niveau hieruit toch de juiste beslissingen afleiden.

Reductie van gegevens. Een recursief systeem is in staat ingekomen informatie te verwerken en informatie van een hogere orde af te geven. Indien bijv. de inkomende informatie een niet-lineaire temperatuur afhankelijke drukindicatie en een temperatuurindicatie bevat, zal een dergelijk systeem de heersende druk als uitgangsinformatie kunnen afgeven.

Behoud van nauwkeurigheid en dynamiek. Bij de reductie van gegevens tot informatie van hogere orde neemt in een recursief systeem de nauwkeurigheid en dynamiek niet af.

Geheugen. Een recursief systeem bevat geheugencapaciteit deels voor de opslag van binnengekomen informatie, deels voor opslag van uit te geven informatie.

Oproepbaar. Een recursief systeem moet op oproep in werking kunnen treden zowel voor inname als afgifte van informatie. Op deze wijze wordt het mogelijk op daarvoor geschikte momenten informatie-uitwisseling te regelen. Bovendien betekent oproepbaarheid een reductie in dissipatie. Men kan gaan rusten wanneer het werk gedaan is.

Eenduidigheid van taal. Het zal duidelijk zijn dat de onafhankelijke delen elkaar moeten kunnen verstaan willen zij samen weer een recursief systeem kunnen vormen.

In systemen die deze eigenschappen bezitten zal naarmate men naar een niveau van hogere orde gaat de informatiestroom niet toenemen. Ook verlies van informatie treedt niet op. Doordat alle niveaus overeenkomstig werken blijft het overzicht behouden. De eigenschappen geven ook criteria voor de afbakening van recursieve systemen. Zo zal het weglaten van geheugencapaciteit direct leiden tot een toename in de omvang van de informatiestromen en in een afname van de beslissingsvaardigheid.

Beschouwingen over het al of niet recursief zijn kunnen ook als criteria dienen voor de afbakening van LSI-systemen.

Digitale en analoge recursieve systemen

Indien recursief zijn een criterium voor de afbakening van LSI-systemen is kan men zich afvragen of aan digitale, hier op te vatten als binaire, of aan analoge signaalverwerking de voorkeur gegeven moet worden om deze LSI-systemen de eigenschappen van recursiviteit te geven. Dit kan men onderzoeken door bestaande systemen te testen op deze eigenschappen. Indien deze een aantal eigenschappen niet bezitten kan men nagaan of de oorzaak te vinden is in het ontbreken van bepaalde elementen.

Door het principe van kwantisatie zijn digitale systemen in staat uit onzekere informatie beslissingen te trekken en de gegevens aldus in onbeperkte mate te bewerken. Bij analoge systemen is de beslissingsvaardigheid gering, de onzekerheden worden in de bewerkingen meegenomen, zodat de reductie beperkt moet blijven.

De nauwkeurigheid (mantisse) in analoge systemen bedraagt 10^3 en de dynamiek (exponent) 10^7. In digitale systemen kan men nauwkeurigheid en dynamiek onbeperkt opvoeren naarmate men het systeem uitbreidt.

Reeds de kleine digitale eenheid, de flip-flop, bezit een geheugen en is oproepbaar door het bezit van een "klok" ingang. In de analoge techniek zijn slechts geheugencellen met een korte onthoudtijd eenvoudig te realiseren. De "sample en hold" schakeling is een analoog element dat een geheugen bezit en oproepbaar is. In beide technieken reduceert oproepbaarheid de dissipatie in de schakelingen en ordent zij de informatiestroom.

De eenduidigheid is zowel in analoge als in digitale systemen aanwezig, zij het dat soms gebruik gemaakt wordt van vastgelegde modulatievormen en codes.

Uit het bovenstaande valt af te leiden dat de flip flop door zijn eigenschappen opgevat kan worden als het digitale recursieve systeem van de eerste orde. De analoge systemen kan men nog niet recursief noemen zolang een aantal componenten ontbreken die kwantisatie, geheugen en oproepbaarheid kunnen inbrengen.

Analoog dynamisch geheugen

De aanwezigheid van nieuwe technologieën en van de configuratie electronica zoals toegepast in de CCD-techniek doet vermoeden, dat binnen niet al te lange tijd het ontbrekende analoge element kan worden toegevoegd. Het principe van dit element is in fig. 11 aangegeven.

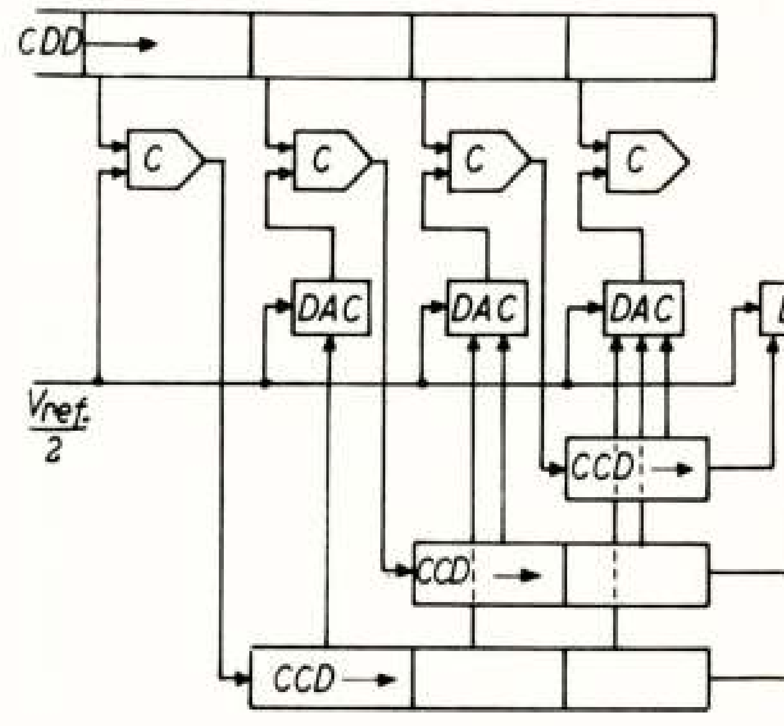


Fig. 11.

Analoge signalen worden in een CCD-schuifgeheugen onthouden en geklokt door geschoven. Als deze signalen in het einde van het schuifgeheugen belanden worden ze stap voor stap met behulp van comparatoren (c) en DAC's gedecodeerd. De korte CCD-schuifregisters bevatten de codes, die tegelijkertijd met de analoge signalen geschoven worden. Wanneer het signaal de laatste plaats bereikt heeft staat hetzelfde signaal, maar nu gekwantiseerd, in de meest rechter DAC. Dit signaal, vergroot met één kwantisatieniveau, kan men nu weer aan het begin van de CCD-lijn invoeren. Is de lek in de CCD-lijn kleiner dan één kwantisatiestap dan elimineert de toevoeging van deze stap bij opnieuw inlezen de invloed van de lek. Op deze wijze is een dynamisch analoog geheugen verkregen dat aan de analoge electronica de mogelijkheid van kwantisatie, geheugen en oproepbaarheid toevoegt.

De ontwikkeling van analoge LSI

Uit de voorgaande beschouwingen omtrent recursiviteit volgt dat de LSI-techniek voor de analoge electronica twee wegen opent

- De eerste weg is de realisatie met behulp van o.a. analoge dynamische geheugens van analoge recursieve systemen van de eerste orde. De LSI-techniek geeft de mogelijkheid deze eerste orde in één circuit te herbergen, zodat uitbouw naar systemen van hogere orde door combinaties denkbaar wordt.

- De tweede weg is het afzien van eigen recursiviteit. De analoge electronica haakt via analoog-digitaalomzetters in de digitale systemen en neemt aldus deel aan systemen van hogere orde.

Het is moeilijk te zeggen welke weg de voorkeur verdient. Het zal afhangen van de soort systemen en ook in welke mate de analoge kwantisatie t.o.v. de digitale in de diverse toepassingen is te prefereren.

CONCLUSIE

In de beschouwingen over de toekomst van de analoge electronica zijn drie punten onderscheiden. De nieuwe technologische mogelijkheden, de wijze waarop men de informatie door het halfgeleider-materiaal stuurt en de wijze waarop men de systemen opbouwt en afbakent.

Het begrip recursiviteit is aangeduid; een opbouw van systemen waarin beslissingsbevoegdheid en samenwerking geordend is.

In principe staat deze wijze van opbouw zowel voor de analoge als digitale electronica open.

Eindhoven, Juni 1975

Voordracht gehouden 21 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

HET ONTWERPEN VAN ANALOGE IC's MET BEHULP VAN BASISSCHAKELINGEN

Ir. K.E. Kuijk
Philips Natuurkundig Laboratorium

A short review is given of the design problems and possibilities of IC's, and the usable basic IC-elements. A number of basic circuits for linear IC's, such as current mirrors and the transconductance multiplier, are treated and their common properties are summarized. With the aid of these, design rules for the use of the basic circuits are derived, and a few examples are given. The conclusions are that the design of most linear IC's becomes simple when using these basic circuits and design rules, and that it has been possible to design new circuits which can only exist in IC form.

Het ontwerpen van analoge IC's is eenvoudig als er gebruik gemaakt wordt van een aantal basisschakelingen met de daarbij behorende ontwerpregels. Voordat de basisschakelingen en de ontwerpregels besproken kunnen worden moeten eerst de ontwerpmoeilijkheden en mogelijkheden van IC's genoemd worden.

ONTWERPPROBLEMEN

De volgende algemene ontwerpproblemen doen zich bij IC's voor:

1. Het vermogen dat gedissipeerd mag worden is beperkt. Dat is b.v. in een 16-pens Dil-omhulling bij kamertemperatuur 600 mW; de junctietemperatuur is dan 125° C. Als het IC bij 75° C omgevingstemperatuur ook nog moet werken wordt dit vermogen tot 300 mW gereduceerd. Voor een schakeling die b.v. met ± 10 V voedingsspanning moet werken betekent dit een maximale stroom van 15 mA! Er moet dus gewoekerd worden met stroom.
2. Er kunnen geen koppel of ontkoppelkondensatoren gebruikt worden; de schakeling moet dus volledig gelijkspanningsgekoppeld zijn. Het is dan voor de hand liggend om twee voedingsspanningen $\pm V_B$ te gebruiken, zodat de signalen toch op aardpotentiaal het IC in en uit kunnen gaan.
3. Er is slechts een zeer beperkte keuze in het aantal aktieve en passieve elementen die gebruikt kunnen worden. Daardoor lijkt het ontwerpen van analoge IC's nauwelijks op het ontwerpen van schakelingen met losse komponenten.

Voordat de bruikbare aktieve en passieve elementen genoemd kunnen worden, moeten er eerst enkele algemene transistorvergelijkingen behandeld worden.

Om te beginnen geldt voor IC-transistors de exponentiële transistorkarakteristiek:

$$I_c = I_o(e^{qV_{be}/kT} - 1) \qquad (1)$$

met I_c: de kollektorstroom
V_{be}: de basis emitterspanning
I_o: de verzadigingsstroom

$$I_o = AT^n e^{-qV_{GO}/kT} \qquad (2)$$

waar V_{GO} de gapspanning van silicium is bij 0 K en A een konstante evenredig met de oppervlakte van het basis-emittergebied. Voor kleine signalen is het eenvoudig om te werken met de klein - signaal parameters (Ref. 1):

$$i_c = S(v_{be} + \frac{1}{\mu}v_{ce})$$
$$i_b = \frac{S}{\beta}(v_{be} - \frac{1}{\mu'}v_{ce}) \qquad (3)$$

De kleine letters stellen de verandering in spanning of stroom voor.

S: steilheid; $S = \frac{qI_c}{kT} \approx 40\ I_c$ af te leiden uit (1)

β: stroomversterkingsfaktor;

μ, μ': terugwerkingsfaktoren; $\mu \approx \mu' \approx 5000$

Bij de behandeling van het frekwentiegedrag van een transistor blijkt het in eerste instantie voldoende om te werken met de frekwentie-afhankelijkheid van de stroomversterkingsfaktor β (Ref. 2):

$$\beta = \frac{\beta_o}{1 + j\beta_o f/f_T} \qquad (4)$$

waarin f_T de (gelijkstroomafhankelijke) afsnijfrekwentie is.

Er dient in de schakelingen vermeden te worden dat de transistor "in verzadiging raakt", d.w.z. dat de kollektor-emitterspanning onder de kniespanning (~ 0.3 V) zakt.

De elementen, die gebruikt kunnen worden in standaardprocessen, zijn:

a. De npn-transistor.
Deze heeft een stroomversterkingsfaktor $\beta \approx 100$ en een maximale afsnijfrekwentie $(f_T)_{max} \approx 500$ MHz.

b. De laterale pnp-transistor.
Deze heeft een lage stroomversterkingsfaktor $\beta \approx 5$ à 20, die sterk stroomafhankelijk is, en een lage afsnijfrekwentie $f_T \approx 5$ MHz.

c. De substraat-pnp.
Deze heeft wat betere eigenschappen dan de laterale pnp-transistor, maar is alleen als volger bruikbaar, omdat het substraat als kollektor fungeert.

d. De diode.
Er zijn een aantal diodes mogelijk; de beste eigenschappen heeft de diode, die uit de npn-transistor gevormd wordt door basis en kollektor door te verbinden (Fig. 1).

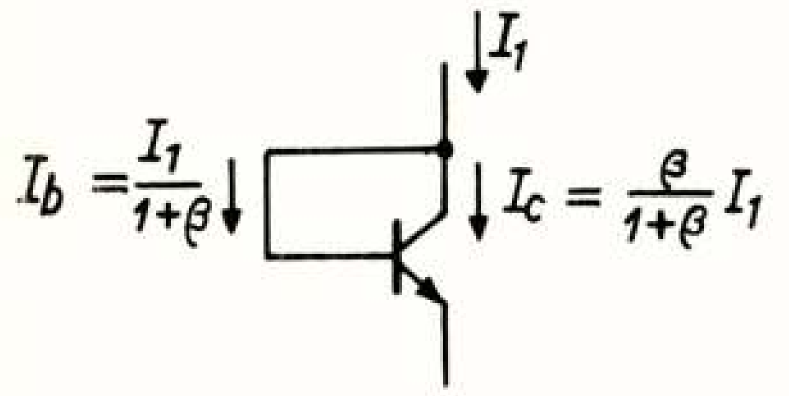


Fig. 1. De diode.

Een transistor met kollektor-basisspanning nul heeft echter nog een hoge stroomversterking. Wordt in de diode een stroom I_1 gestuurd dan loopt deze voornamelijk door het kollektorgebied: $I_c = \frac{\beta}{1+\beta} I_1 \approx I_1$! Voor de diode geldt dus ook de exponentiële karakteristiek (1). De diode is een laagohmig element met differentiaalweerstand $r_o = \frac{1}{S}$.

e. De weerstand.
De weerstand die verkregen wordt door een basislaag te voorzien van twee kontakten heeft de beste eigenschappen. Deze weerstanden hebben een absolute onnauwkeurigheid van ± 20%, een relatieve van ± 2%, en een temperatuurkoëfficient van 1 à 3‰ °C. Een weerstand van 10 KΩ neemt ongeveer de oppervlakte in van 4 à 5 kleine npn-transistors. Grote waarden dienen dus vermeden te worden.

f. De kondensator.
Er zijn twee soorten kondensatoren, nl. MOST-kondensatoren van maximaal ~5pF en (gesperde) basis-emitter-kondensatoren van max. ~30pF, die sterk spanningsafhankelijk zijn. Kondensatoren dienen in feite ook vermeden te worden.

ONTWERPMOGELIJKHEDEN

1. De eigenschap dat twee geometrisch identieke elementen dicht bij elkaar in een IC erg aan elkaar gelijk zijn geeft de belangrijkste ontwerpmogelijkheid, ook omdat twee elementen praktisch dezelfde temperatuur zullen hebben, nl. op 0,01 à 0,001 °C gelijk. Voor twee geometrisch identieke transistors die zich vlak bij elkaar bevinden zal dus bijna dezelfde exponentiële karakteristiek (1) gelden. Het verschil in verzadigingsstromen is ongeveer 1 à 10%, en dat is dus ook de ongelijkheid in kollektorstromen bij gelijke basis-emitter-spanningen. Voor de eenvoud zullen we in het vervolg aannemen dat de kollektorstromen van twee identieke transistors gelijk zijn, bij gelijke basis-emitterspanning (en gelijke kollektor-emitterspanning!).
2. Uit vergelijkingen (1) en (2) volgt ook onmiddellijk dat als de oppervlaktes van twee transistors ongelijk zijn de verhouding van de kollektorstromen bij gelijke basis-emitterspanning gelijk is aan de oppervlakte verhouding (om precies te zijn: van het basis-emittergebied) van de transistors, met diezelfde nauwkeurigheid van 1 à 10%.

BASISSCHAKELINGEN

1. De differentiaaltrap (Fig. 2). Deze komt allereerst voor aan de ingang van IC's wegens het groot aantal gunstige eigenschappen die door de balanswerking ontstaan, zoals:
   a. onderdrukking (rejectie) van gemeenschappelijke signalen.
   b. offset-spanningen en stromen die klein zijn en weinig met de temperatuur veranderen.

   De differentiaaltrap wordt algemeen in ver-

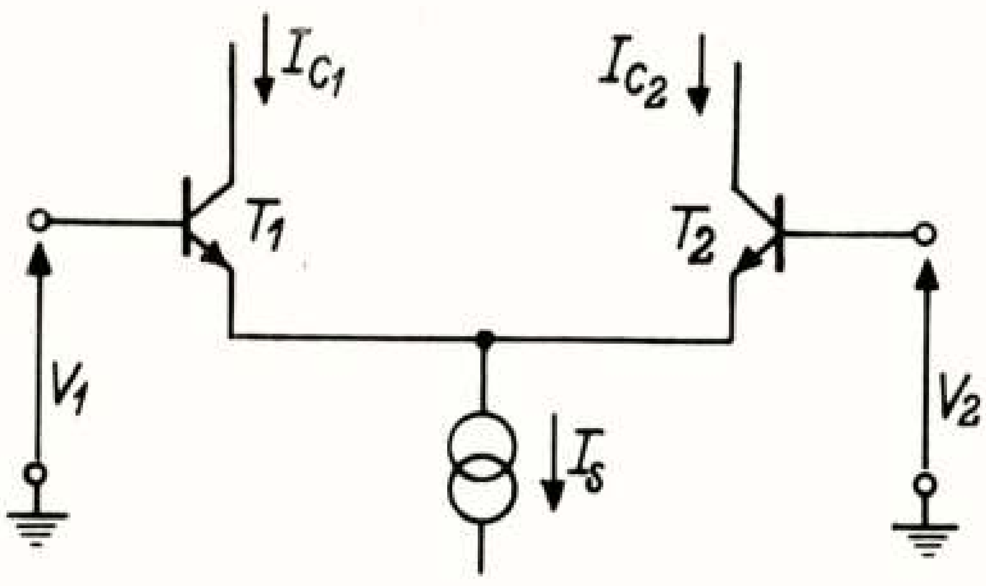


Fig. 2. De differentiaaltrap.

sterkertrappen gebruikt omdat (ont)koppelkondensatoren overbodig zijn, terwijl de stroom toch goed vastligt.
Een differentiaaltrap heeft een redelijke ingangsimpedantie en een hoge uitgangsimpedantie.

2. Een uitbreiding van de differentiaaltrap met twee diodes levert een vermenigvuldiger op (Fig. 3). (Ref. 3).

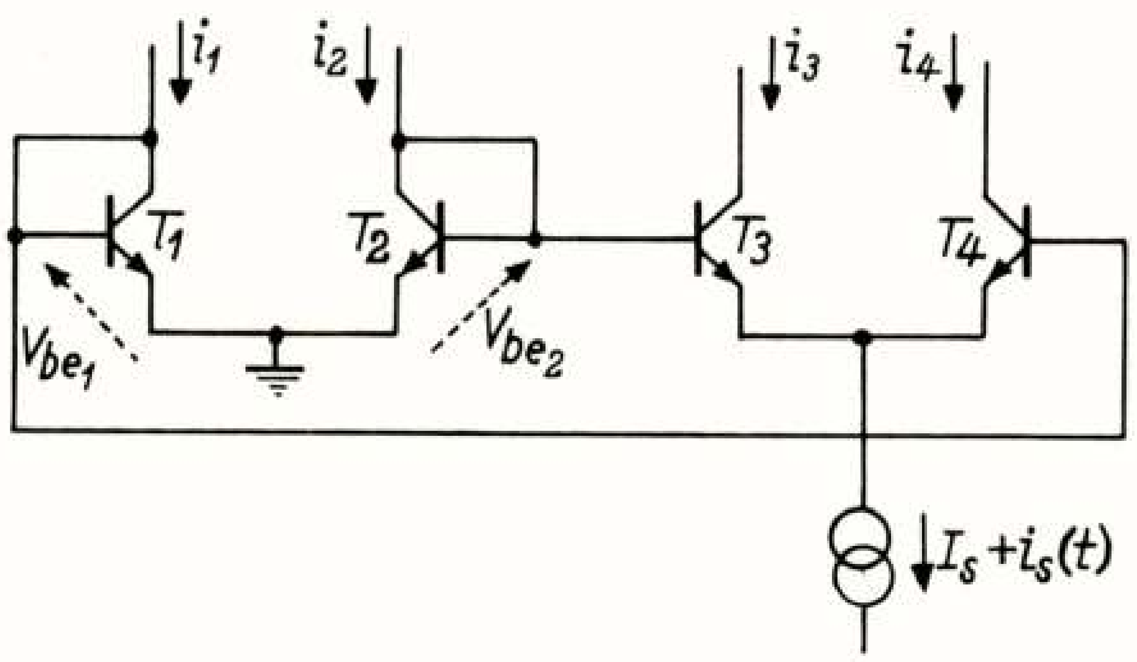


Fig. 3. Het principeschema van een vermenigvuldiger.

Deze kan typisch alleen in IC vorm bestaan door de gelijkheid die (per paar) van de transistors geëist wordt. Deze schakeling is stroomgestuurd, heeft een lage ingangsimpedantie en hoge uitgangsimpedantie. De werking is als volgt: Er vindt een omzetting plaats in de diodes van stromen i_1 en i_2 in basis-emitterspanningen, waarbij uit de exponentiële transistorkarakteristiek volgt dat een konstante stroomverhouding i_2/i_1 een konstant verschil in basis-emitterspanning $V_{be2}-V_{be1}$ ten gevolge heeft. Het omgekeerde is ook waar en dat betekent dat daardoor de stroomverhouding in T_3 en T_4 vastligt, dus dat er geldt: $\frac{i_3}{i_4} = \frac{i_2}{i_1}$, onafhankelijk van de grootte van de staartstroom I_s. Door de verhouding i_2/i_1 te moduleren met een ingangssignaal en de staartstroom I_s met een tweede

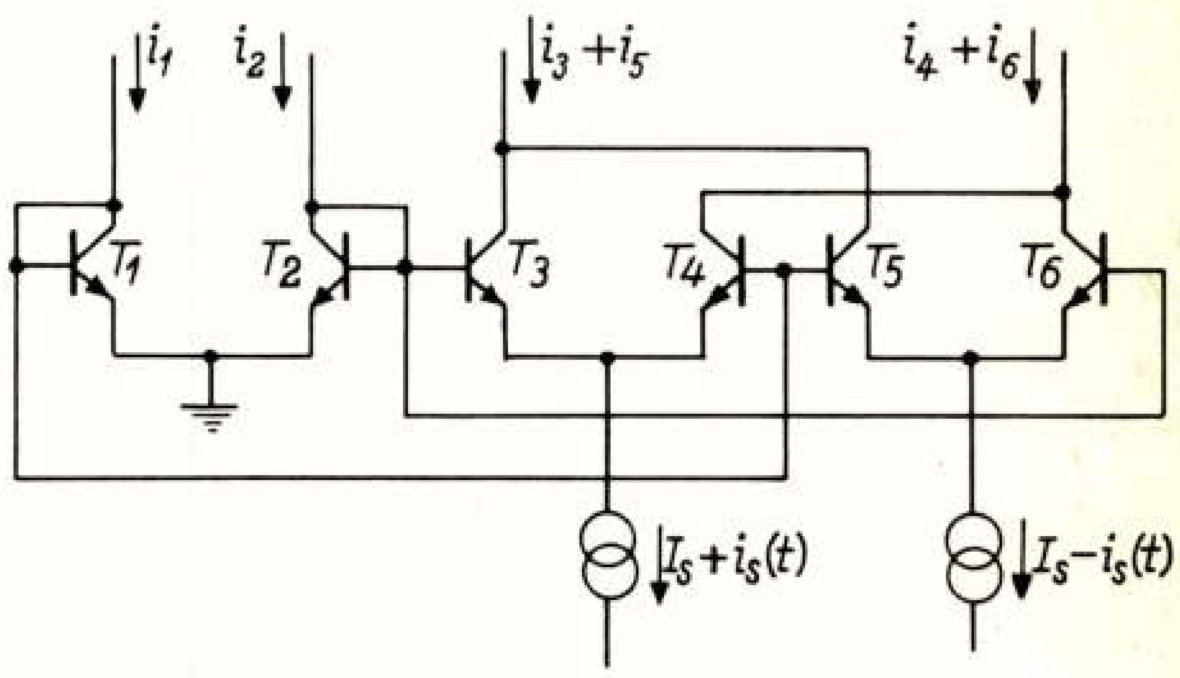


Fig. 4. De gebalanceerde vermenigvuldiger.

ingangssignaal ontstaat er in de uitgangsstroom o.a. een produkt term. Als de schakeling volledig gebalanceerd wordt uitgevoerd met behulp van een tweede differentiaal paar (Fig. 4) is het mogelijk alleen deze produktterm over te houden. De stromen kunnen zeer diep gemoduleerd worden, nl. tot bijna nul toe.

3. De diode-transistorkombinatie, ook wel "tweeling" geheten (Fig. 5). Aangezien de diode nog steeds aan de exponentiële transistorkarakteristiek voldoet, zal bij gebruik van identieke transistors een ingangs-

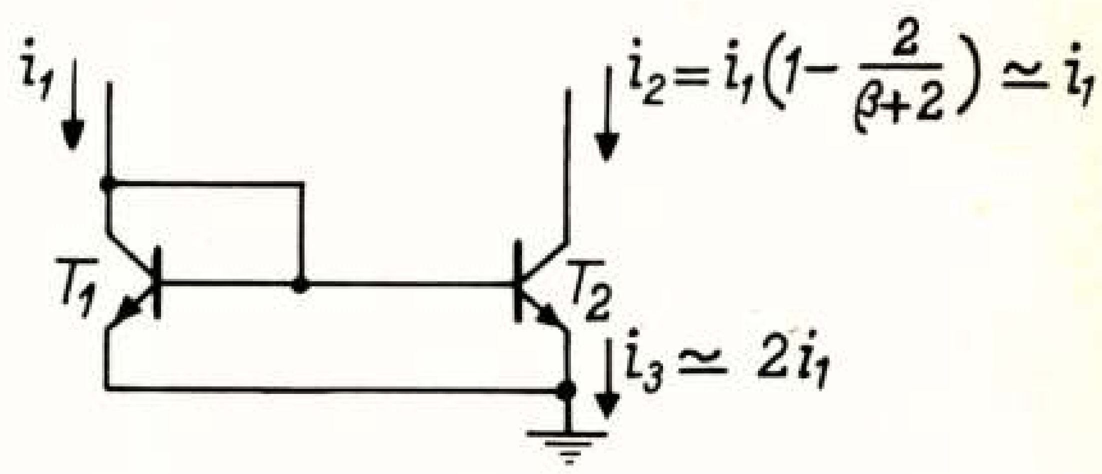


Fig. 5. De tweeling-stroomspiegel.

stroom in de diode een praktisch gelijke uitgangsstroom in de transistor tengevolge hebben. Een dergelijke kombinatie heeft dus een stroomoverdracht ~1, een lage ingangsimpedantie en een hoge uitgangsimpedantie, en wordt "stroomspiegel" genoemd.
Deze, en andere, stroomspiegels blijken erg belangrijke nieuwe basisschakelingen te zijn. De overdracht van ~1 geldt nl. zowel voor gelijk als wisselstroom en wel tot hoge frekwenties toe; verder is er een stroommodulatie tot ongeveer nul mogelijk, en de uitgangsspanningsvariatie mag erg groot zijn. De minimale kollektor-emitterspanning van de uitgangstransistor mag $V_{kn} \approx 300$ mV zijn.

4. Bij bepaalde toepassingen van stroomspiegels is een hogere uitgangsimpedantie gewenst dan

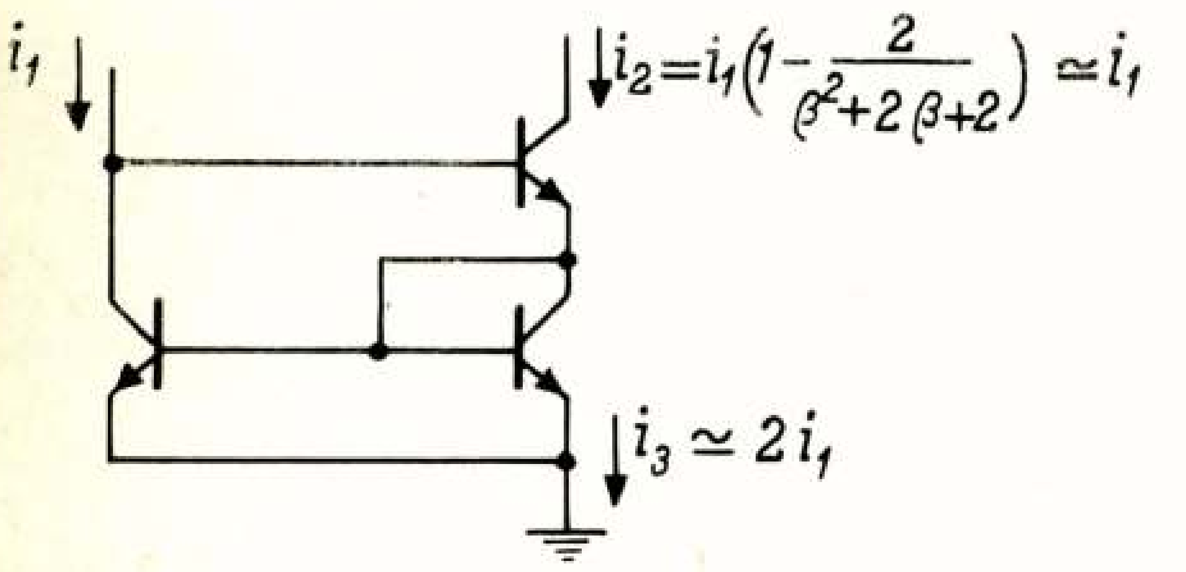


Fig. 6. De drieling-stroomspiegel.

haalbaar is met een enkele transistor. Die kan verkregen worden met een drieling stroomspiegel (Fig. 6), waarvan de werking berust op een tweeling stroomspiegel met een tegenkoppeling via een extra transistor (Ref. 4). Doordat er twee basisstromen tegengesteld tussen in- en uitgangstak oversteken is de overdracht nauwkeuriger gelijk aan 1 d.w.z. wordt minder beïnvloed door de stroomversterkingsfaktor β. De uitgangsimpedantie is zeer hoog en benadert die van een kaskode. De ingangsimpedantie is weer laag. De uitgangsgelijkspanning mag minimaal $V_{be} + V_{kn} \approx 1$ V zijn. Het is ook nog mogelijk om de diode als extra ingang te gebruiken; er geldt dan $i_2 \approx i_1 - i_4$ (Fig. 7). (Ref. 5).

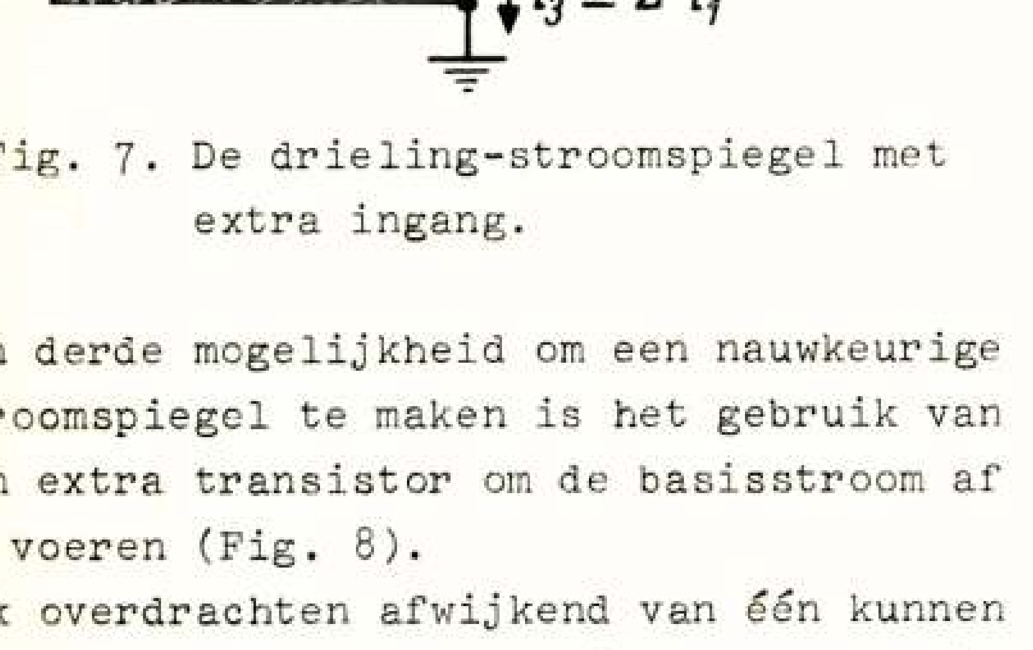


Fig. 7. De drieling-stroomspiegel met extra ingang.

5. Een derde mogelijkheid om een nauwkeurige stroomspiegel te maken is het gebruik van een extra transistor om de basisstroom af te voeren (Fig. 8).
6. Ook overdrachten afwijkend van één kunnen gemaakt worden door de emitteroppervlaktes overeenkomstig de gewenste verhouding te kiezen (Fig. 9). Verhoudingen groter dan 5 of kleiner dan 1/5 zijn onpraktisch vanwege de oppervlakte die dit kost.

Al deze genoemde schakelingen hebben de eigenschappen, dat:

a) de overdrachten voor gelijk- en wisselstroom gelijk zijn.

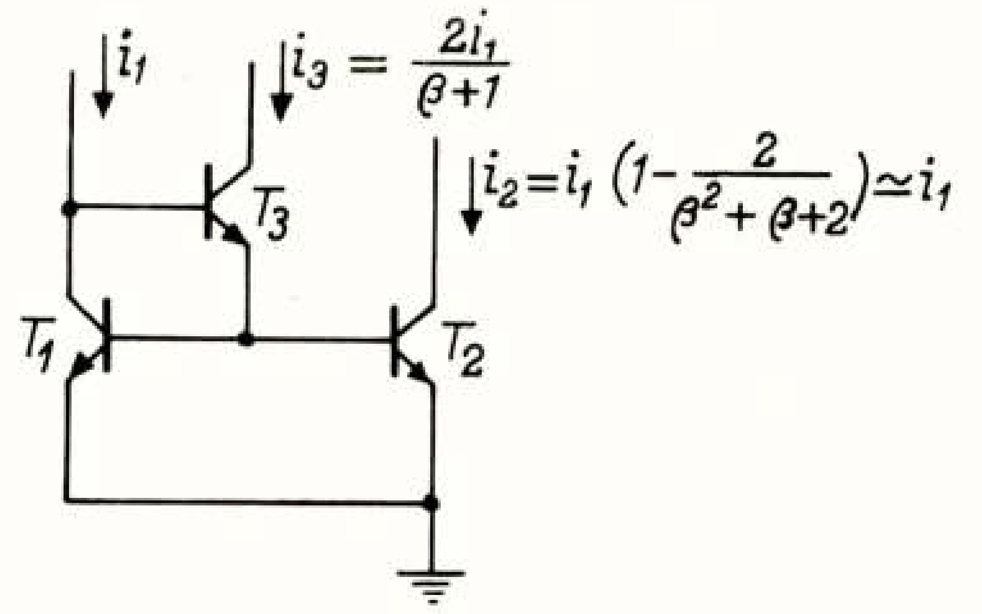


Fig. 8. De stroomspiegel met afvoer van basisstroom.

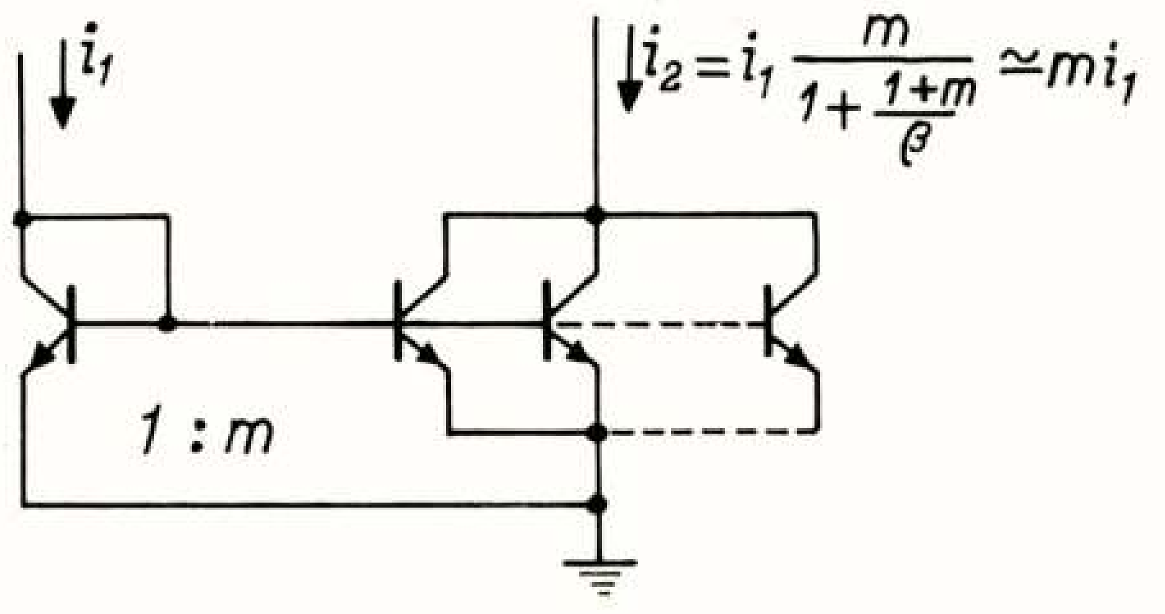


Fig. 9. Een schakeling met stroomoverdracht ongelijk aan één.

b) de gelijkstroom tot ongeveer nul gemoduleerd mag worden.
c) de overdracht temperatuur onafhankelijk is.
d) de uitgangsspanningszwaai erg groot mag zijn.
e) de ingangsimpedantie laag is en de uitgangsimpedantie hoog is; d.w.z. het zijn, afgezien van de differentiaaltrap, stroomgestuurde stroombronnen.

7. Voor overdrachten groter dan ~5, of kleiner dan ~1/5, wordt er vaak tegenkoppeling toegepast. In Fig. 10 geldt: $I_1R_1 = V_{be2} - V_{be1} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}\frac{I_{01}}{I_{02}}$. De verhouding $\frac{I_{01}}{I_{02}}$ is gelijk aan de verhouding van (basis-emitter) oppervlaktes, b.v. één, en $I_1R_1 = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_2}{I_1}$. De hiermee samenhangende overdracht is niet-lineair, dus ongelijk voor gelijkstromen en wisselstromen, en sterk temperatuur afhankelijk.
De schakeling kan dienen om een gelijkstroombron, b.v. in de staart van een differentiaaltrap, te sturen. De spiegelschakelingen kunnen daar ook voor gebruikt worden, en zijn daar in eerste instantie ook voor bedoeld, maar gaan wat hun toepassingen betreft veel verder.

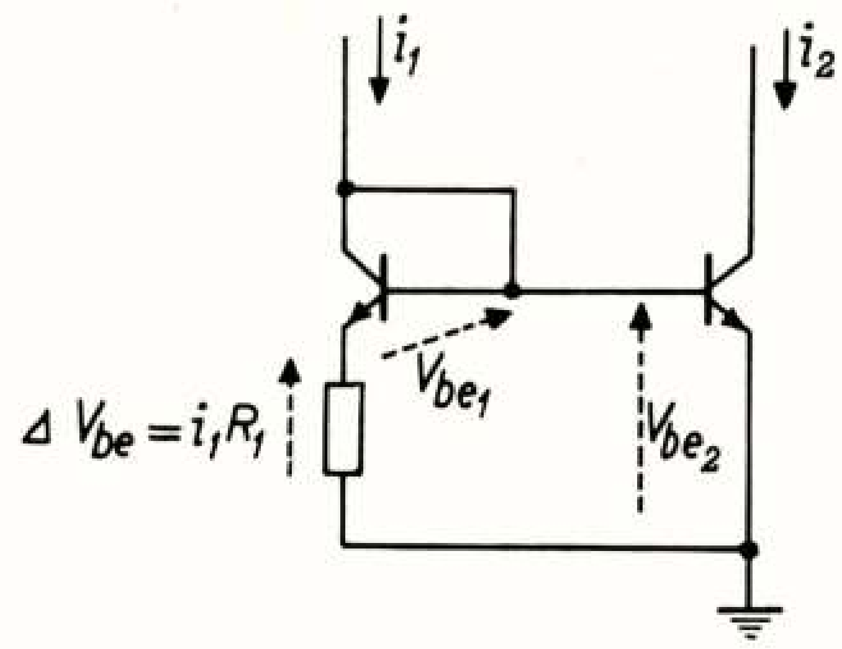


Fig. 10. Een schakeling voor grote of kleine gelijkstroomoverdrachten.

ONTWERPMOGELIJKHEDEN MET BASISSCHAKELINGEN

Het feit dat veel basisschakelingen met stroom gestuurd worden, terwijl hun uitgang zich weer als een stroombron gedraagt, levert de volgende ontwerpmogelijkheden op:

1. De schakelingen kunnen rechtstreeks op elkaar aangesloten worden, zonder dat de eigenschappen van de schakelingen worden aangetast.
2. De voedingsspanning zal nauwelijks invloed hebben op de eigenschappen van de schakeling.
3. Omdat de meeste basisschakelingen aan 0,5 à 1 V voldoende hebben kan de voedingsspanning tamelijk laag zijn (batterijvoeding), en zijn er grote spanningszwaaien mogelijk.
4. Doordat de schakelingen berusten op de bewerkingen van stromen, en doordat dit maar weinig basis-emitterspanningsvariatie vraagt, hoeven parasitaire kapaciteiten nauwelijks opgeladen te worden en hebben de schakelingen goede h.f. eigenschappen.
5. Als er voor een bepaalde bewerking te weinig spanningsruimte is, kunnen de stromen eerst gespiegeld worden om zo een ruimte te kreëren die bijna gelijk is aan de voedingsspanning.

EISEN AAN HET TOTALE ONTWERP

De eisen die gesteld worden aan een analoge geïntegreerde schakeling volgen uit het feit, dat deze schakeling vaak weer een onderdeel, of "bouwblokje" van een systeem zal zijn, en liefst wat universeler bruikbaar. In het algemeen zullen de bouwblokjes met een spanning gestuurd worden en weer een spanningsbron als uitgang hebben. De bouwblokjes zullen dus aan de volgende eisen meestal moeten voldoen:

1. Hoge ingangsimpedantie, lage ingangsstroom.
2. Lage uitgangsimpedantie, de uitgang zal enig vermogen moeten kunnen leveren.
3. De signalen komen op gelijkspanningsniveau nul binnen en gaan er weer op nul-niveau uit. Het gevolg hiervan is dat het eenvoudig is om twee voedingsspanningen $+V_B$ en $-V_B$ te gebruiken.
4. De maximale in- en uitgangsspanningen moeten de voedingsspanningen zo dicht mogelijk kunnen benaderen.
5. De eigenschappen van het bouwblokje moeten onafhankelijk van de voedingsspanning zijn.

TOEPASSINGEN VAN BASISSCHAKELINGEN

De eerste toepassing is de kombinatie van een npn-differentiaaltrap en een pnp-stroomspiegel (Fig. 11), welke rechtstreeks gekoppeld zijn; de stroom i_{c1} uit de als stroombron werkende kollektor gaat de laagohmige ingang van de drieling in. De uitgang van de drieling is gekoppeld met de

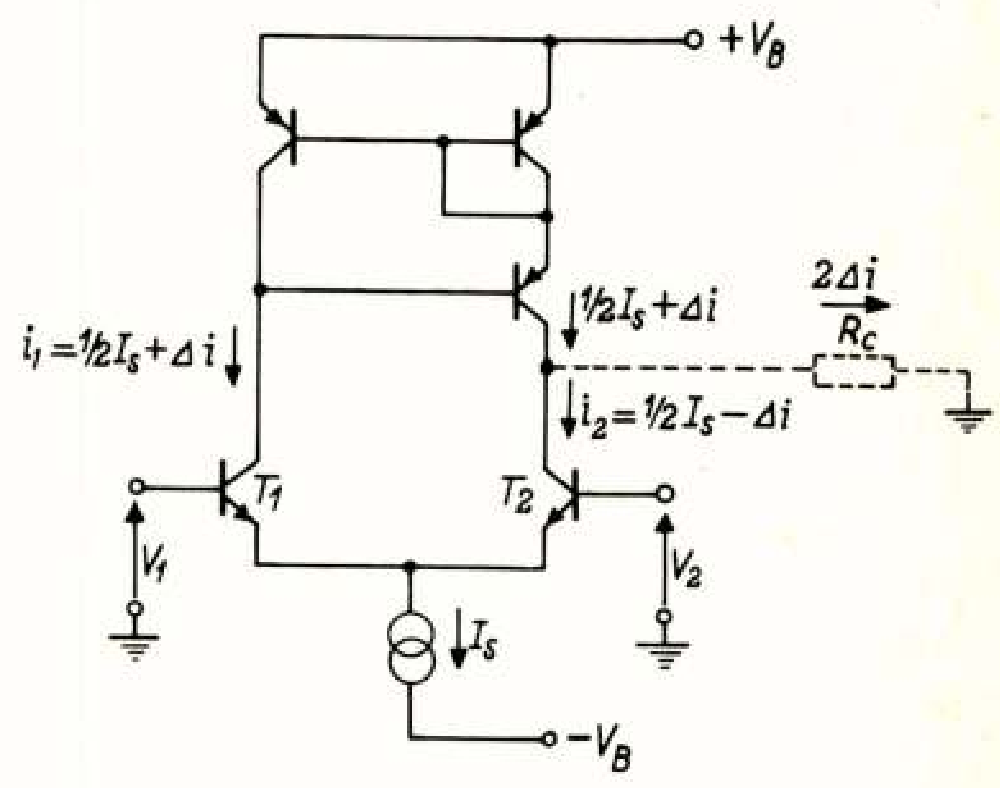


Fig. 11. Een verschiltrap met aktieve kollektorimpedantie.

tweede uitgang van de differentiaaltrap, d.w.z. de kollektorimpedantie van T_2 is de uitgangsimpedantie van de drieling, en is dus erg hoog. Als de stroom door T_1 is: $\frac{1}{2}I_s + \Delta i$ en dus in T_2 een stroom loopt $\frac{1}{2}I_s - \Delta i$, dan loopt er in de kollektorimpedantie R_c een stroom $2\Delta i$. De drieling werkt hier als differentiëel-enkelzijdig omzetter en kollektor impedantie. Een dergelijke trap kan al veel versterking geven, nl. ~5000x.

Het nadeel van de schakeling is, dat er direct een signaalspanning over de kollektorweerstand R_c ontstaat. Als de differentiaaltrap b.v. de ingangstrap van een IC is, betekent dit o.m. dat het gemeenschappelijk signaal op

de ingangen niet erg hoog kan zijn. In dit geval kunnen we de stromen echter eerst spiegelen (Fig. 12). Ook hier zijn de basisschakelingen rechtstreeks gekoppeld; met behulp van twee extra spiegels, een pnp en een npn-spiegel is dan bereikt dat er

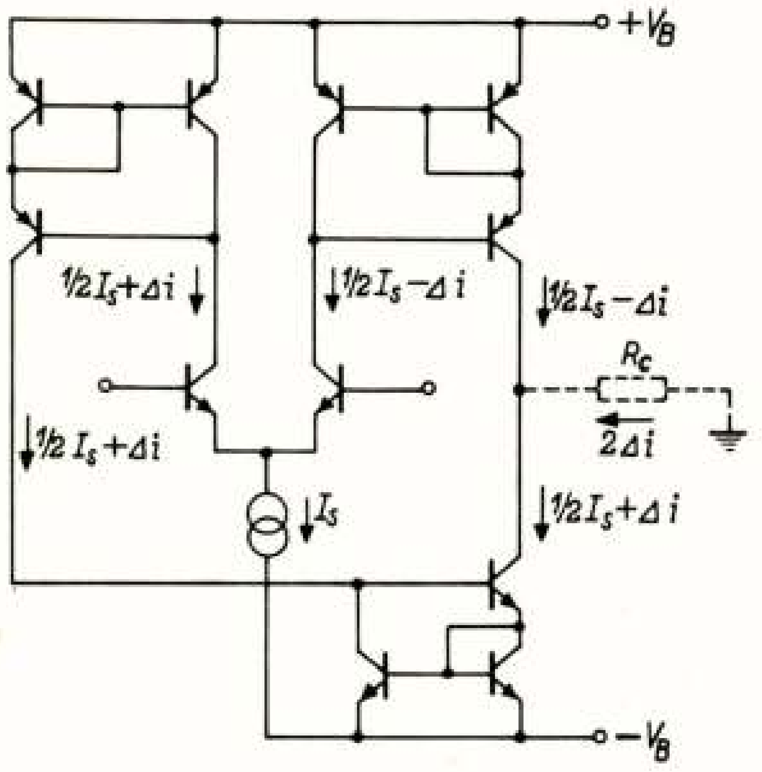


Fig. 12. Een voorbeeld van spiegeling ter verkrijging van spanningsruimte.

een groot gemeenschappelijk signaal op de ingangen kan staan en dat de uitgangsspanningszwaai erg groot kan zijn, nl. bijna de volledige voedingsspanning. Bovendien kan deze spanning op aardpotentiaal zijn. Dit soort schakelingen is zeer bruikbaar in operationele versterker schakelingen (Ref. 5).

Een leuke toepassing van stroomspiegels is in Fig. 13 aangegeven. Een npn- en een pnp-spiegel zijn rechtstreeks wederzijds op elkaar

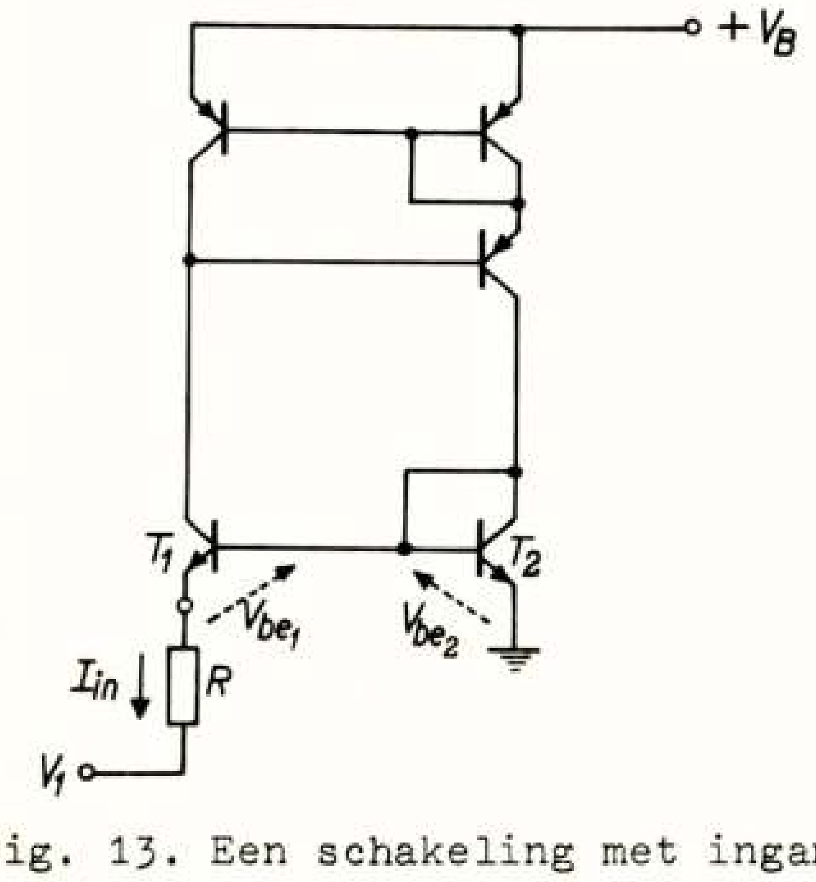


Fig. 13. Een schakeling met ingangsimpedantie nul.

aangesloten. Een emitter van de npn-spiegel is via een weerstand met een ingangsspanning V_{in} verbonden. Bij een negatieve ingangsspanning vloeit er een stroom I_{in} in T_1, die via de pnp-spiegel een identieke stroom in T_2 geeft. Dus geldt $V_{be1} = V_{be2}$, d.w.z. de emitter van T_1 blijft precies op aardpotentiaal, onafhankelijk van de grootte van I_{in}, en de ingangsimpedantie op de emitter van T_1 is daarom nul. De schakeling kan b.v. gebruikt worden als spanning-stroom omzetter. Ditzelfde principe van kompensatie is toegepast in Fig. 14 a en b voor schakelingen die als "superemittervolgers" dienst kunnen doen.

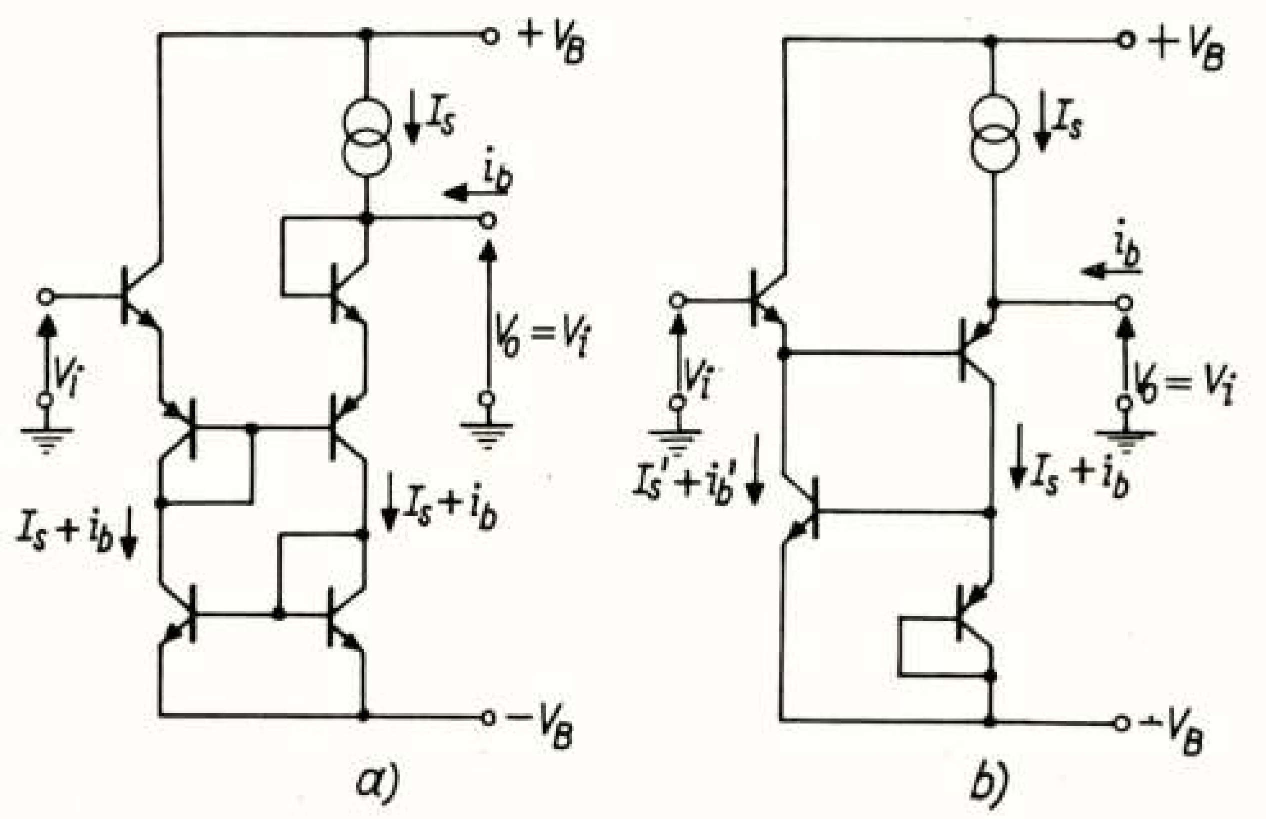


Fig. 14. Twee super-emittervolgers.

Een veel gebruikte stroomstabilisatieschakeling, die b.v. kan dienen om alle stroombronnen in te stellen in een IC, is aangegeven in Fig. 15, (Ref. 5). Een pnp-spiegel en een

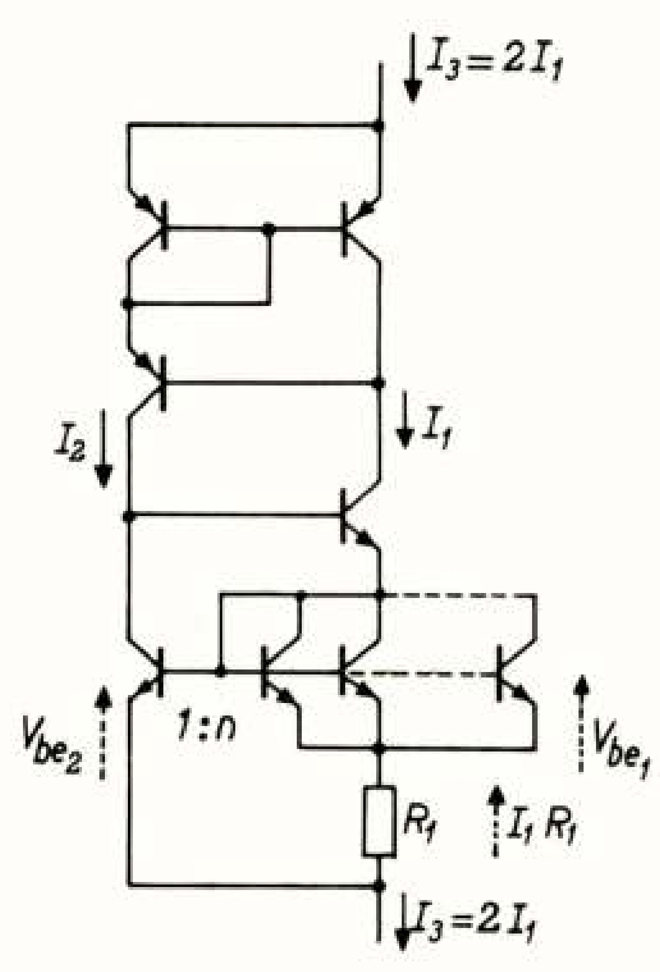


Fig. 15. Een stroomstabilisatieschakeling.

npn-stroomversterker (1:n), welke tegengekoppeld is, zijn wederzijds op elkaar aangesloten. Voor kleine stromen, b.v. lekstromen, is er een rondgaande (DC) versterking gelijk aan n; de gelijkstroom zal dus toenemen. Voor grote stromen wordt de tegenkoppeling effektief, en bij een bepaalde stroom is de rondgaande DC-versterking gelijk aan 1 geworden, en zal de stroom stabiliseren. De grootte van deze stroom is als volgt uit te rekenen. In de eerste plaats bewerkt de pnp-spiegel dat de

stroom in beide takken gelijk is. Verder geldt in de npn-spiegel:

$$V_{be2} - V_{be1} = I_1R_1 \qquad (5)$$

$$\text{of} \quad I_1 = \frac{1}{R_1}\frac{kT}{q}\ln\frac{I_2}{I_1}\frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{1}{R_1}\frac{kT}{q}\ln n = $$

$$= \frac{26.10^{-3}}{R_1}\ln n \qquad (6)$$

Is b.v. $I_1 = I_2 = 100$ µA gewenst, en n = 4, dan moet gelden R_1 = 360 Ω. De stroom $I_3 = 2I_1$ is te gebruiken voor het instellen van andere stroombronnen, b.v. via spiegels. De stromen I_1, I_2 en I_3 zijn recht evenredig met de temperatuur. De voedingsspanning mag tussen wijde grenzen variëren, met een minimum van ~2 V; de stroom varieert met ~1% per volt.

De zo verkregen stroom, welke recht evenredig is met de temperatuur — en wel omdat het verschil ΔV_{be} van twee basis-emitterspanningen van transistoren met een konstante stroomverhouding recht evenredig is met de temperatuur — kan gebruikt worden om een temperatuur-onafhankelijke referentiespanning te kreëren. Daartoe wordt de stroom I_3 in de serieschakeling van een diode en een weerstand gestuurd, Fig. 16. De spanning over de weerstand neemt dan

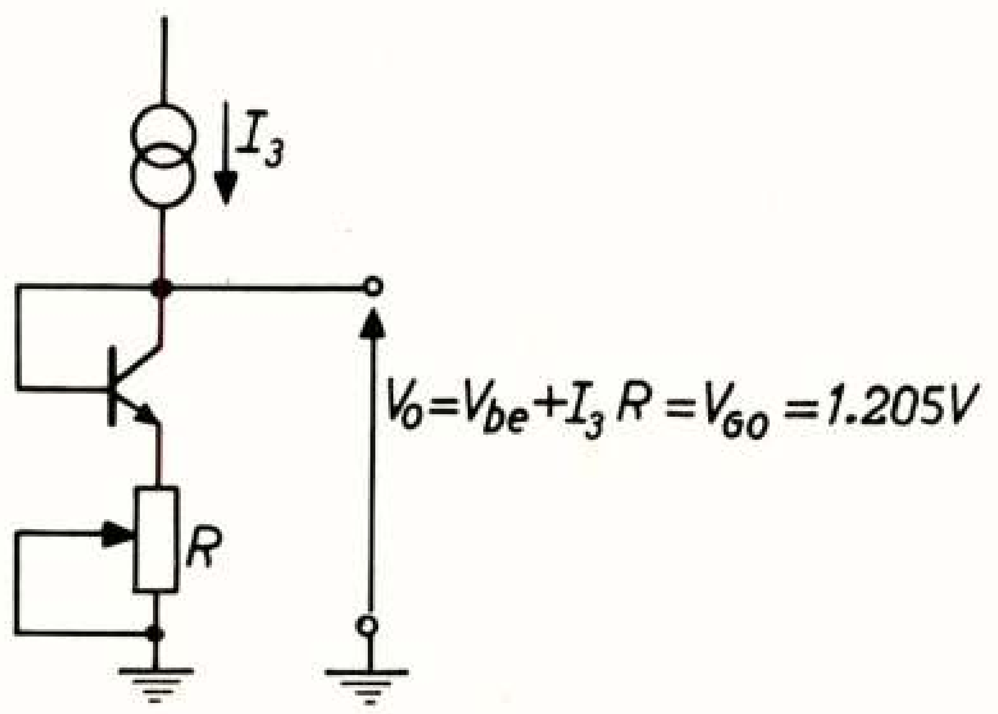


Fig. 16. Een spanningsstabilisatiemethode.

recht evenredig toe met de temperatuur; de diodespanning neemt echter recht evenredig met de temperatuur af. Met behulp van vgl. (1) en (2) is nl. af te leiden:

$$V_{be} = V_{GO} - C.T \qquad (7)$$

waarbij V_{GO} de gapspanning is van silicium bij 0 Kelvin, V_{GO} = 1,205 V. Als de som van de twee spanningen nu gelijk is aan de gapspanning, wat verkregen kan worden door afregelen van de weerstand, is deze spanning automatisch temperatuuronafhankelijk. Zo wordt een lage referentiespanning verkregen, die kan wedijveren met de beste zener diodes (Ref. 6), wat betreft temperatuurstabiliteit en stabiliteit in de tijd, en dat terwijl er nauwelijks selektie nodig is.

KONKLUSIES

Het ontwerpen van analoge geïntegreerde schakelingen wordt eenvoudig door gebruik te maken van een aantal basisschakelingen en enkele ontwerpregels. De basisschakelingen hebben met elkaar gemeen dat ze uit twee tot vier transistors bestaan en dus simpel zijn; dat ze gebruik maken van gelijkheid, dus van kompensatie i.p.v. tegenkoppeling en dat ze bijna allemaal stroomgestuurde stroombronnen zijn, waardoor ze gemakkelijk koppelbaar zijn. Met behulp van deze basisschakelingen zijn de meeste normale schakelingen te ontwerpen. Als er ook nog gebruik gemaakt wordt van de zuiver exponentiële transistor-karakteristiek en van de gapspanning van silicium is het zelfs mogelijk nieuwe schakelingen te ontwerpen (vermenigvuldiger, referentiespanningsbron) die buiten de IC-vorm nog niet bestonden.

REFERENTIES

1. G. Klein, J.J. Zaalberg van Zelst, "Instrumentele Elektronica", Philips Technische Bibliotheek, p. 92, e.v.
2. R.M. Warner Jr., J.N. Fordemwalt, "Geïntegreerde Schakelingen", Prisma-Technica 24, p. 116.
3. B. Gilbert, "A DC-500 MHz Amplifier/Multiplier Principle", 1968 ISSCC Digest of Technical Papers, p. 114-115.
4. G.R. Wilson, "A Monolithic Junction FET-NPN Operational Amplifier", 1968 ISSCC Digest of Technical Papers, p. 20-21.
5. Th.J. v. Kessel, R.J. v.d. Plassche, "Integrated linear basic circuits", Philips Technical Review, Vol. 32, no. 1, p. 1-12, 1971.
6. K.E. Kuijk, "A Precision Reference Voltage Source", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. SC-8, nr. 3. June 1973, p. 222-226.

Voordracht gehouden 21 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

UITGANGSPUNTEN EN RANDVOORWAARDEN BIJ HET ONTWERPEN IN DE ELEKTRONICA

J. Davidse
Afdeling der Elektrotechniek, T.H.-Delft

Basic considerations and boundary conditions in electronic design. An attempt is made to make an inventory of non-specific fundamental constraints which apply to electronic design work. A classification in five classes is proposed, viz. physical, technological, economic, ergonomic and historical boundary conditions, which are subsequently discussed in some detail. In a summarizing survey a number of conclusions is formulated.

1. INLEIDING

Wie zich bezint op het onderwerp "ontwerpen in de elektronica" ziet zich geconfronteerd met een veelheid van probleemgebieden die op het eerste gezicht weinig verwantschap vertonen. Men kan enerzijds zinvol onderscheid maken naar de technologische infrastructuur - discrete schakelingen, bipolaire geïntegreerde schakelingen, MOS geïntegreerde schakelingen, enz. - anderzijds naar toepassingsgebieden - communicatietechniek, meettechniek, computers, enz. -. De combinatie van deze twee loodrecht op elkaar staande indelingen levert een overvloed aan specifieke probleemgebieden op. Men behoeft niet te twijfelen aan het nut van een dergelijke indeling om daarnaast toch ook de vraag te stellen of er algemene uitgangspunten met betrekking tot het ontwerpen in de elektronica aan te geven zijn en of het mogelijk is algemene randvoorwaarden aan te wijzen. Algemeen in die zin dat ze betekenis hebben onafhankelijk van technologische premissen en onafhankelijk van toepassingsgebieden. Deze bijdrage stelt zich ten doel een poging te ondernemen tot het overwegen van deze vraagstelling.

Wat is ontwerpen in de elektronica? Aan het begin van elk ontwerp staat een vraag naar het realiseren van een specifieke functie. De omschrijving van deze functie legt de eisen vast waaraan het te realiseren ontwerp in ieder geval zal moeten voldoen. De ontwerper dient nu de gevraagde functie nauwkeurig te analyseren en vervolgens te komen tot een vertaling in elektronische schakelingen, die hij met behulp van de beschikbare elektronische componenten en technologische hulpmiddelen moet kunnen realiseren. Een ieder die wel eens over ontwerpproblemen, in welk vakgebied dan ook, heeft nagedacht, weet dat ontwerpen goeddeels neerkomt op het vinden van goede compromissen. Er zijn allerlei beperkende factoren die de ontwerper aan banden leggen en die maken dat hij de belangrijkheid van de vele eisen en wensen tegen elkaar moet afwegen. Die beperkende factoren vormen voor elk ontwerpprobleem de randvoorwaarden die beslissend zijn voor de conceptie en uitwerking van het ontwerp. De bedoelde beperkende factoren ("constraints") zijn van zeer algemene aard en ze lijken op het eerste gezicht weinig aanknopingspunten te bieden voor het formuleren van bruikbare ontwerpbeschouwingen. Laten we echter, om enige orde in ons denken aan te brengen, eerst eens trachten deze "contraints" enigermate te rubriceren. Ik stel u voor een vijftal rubrieken te onderscheiden:

1) - fysische beperkingen
2) - technologische "
3) - economische "
4) - ergonomische "
5) - historische "

We zullen nu trachten deze verschillende categorieën van "constraints" wat nader te bezien, waarbij we de aangegeven volgorde zullen aanhouden.

2. FYSISCHE BEPERKINGEN

De door de natuurwetten bepaalde beperkingen zijn de meest fundamentele van alle. Zij binden de ontwerper aan absolute grenzen. Praktisch komt het echter zelden voor dat de door de natuur bepaalde limieten bereikt of zelfs maar benaderd worden. Een voorbeeld van een geval waarin dit wel gebeurt is de röntgenbeeldversterker. De bereikbare gevoeligheid vindt hier haar grens in de quantumnatuur van elektromagnetische straling. Dat deze grens in een praktisch ontwerp juist hier ook nagenoeg bereikt wordt is niet zo verwonderlijk als men bedenkt dat röntgenquanta relatief zeer grote brokken energie vertegenwoordigen. Door röntgenstraling gedragen informatie is daardoor van nature erg "klonterig", zodat het relatief gemakkelijk is technische middelen te ontwikkelen die niet veel extra bijdragen tot het verdoezelen van de informatiestroom, technisch gezegd: die de signaal-ruis verhouding van de primaire informatiestroom niet verlagen. Overigens mag gezegd worden dat het ook voor de veel langgolviger straling van het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum gelukt opnemers te ontwerpen wier gevoeligheid reeds vrij dicht nadert tot de fysische, door het quanteuze karakter van het licht bepaalde limiet. Deze voorbeelden tonen aan dat fysische grenzen wel degelijk belissend kunnen zijn voor de ont-

werper van elektronische toestellen en alleen al hierom is het nodig dat hij zich steeds terdege bewust is van het bestaan van zulke grenzen en van hun aard.
Dat de natuurwetten de werkelijke horizon van de ontwerper vormen is uitzondering. Probeert men bijvoorbeeld na te gaan hoeveel atomen er minstens moeten zijn betrokken bij het bij de normale omgevingstemperatuur trefzeker gedefinieerd houden van een ladingstoestand die 1 bit vertegenwoordigt, dan komt men uit op een aantal van ca. 100. Dit is een echte fysische limiet. Gaat men uit van de thans beschikbare planaire techniek, dan kan men beredeneren dat de bereikbare dichtheid ligt bij ca. 10^{12} à 10^{13} atomen per bit, d.i. in dezelfde orde van grootte als het aantal atomen dat een zenuwcel of neuron omvat. Hier zijn we dus heel ver van de fysische limiet verwijderd! Soortgelijke beschouwingen zijn mogelijk ten aanzien van de bereikbare snelheid van informatie-overdracht, ten aanzien van de minimaal hiervoor benodigde energie, enz. In het licht van zulke overwegingen zou men wellicht geneigd zijn het nadenken over de door de natuur gestelde absolute grenzen in de meeste gevallen als een "exercise in futility" te kwalificeren. Om minstens twee redenen moet dit ontraden worden. In de eerste plaats is de afstand tussen wat technologisch haalbaar is en wat fysisch haalbaar is, een maat voor de ruimte voor ontwikkeling van nieuwe technologische mogelijkheden. Deze afstand bepaalt de omvang van het voorterrein van de ontwikkeling en geeft daarmee een indicatie van de toekomstperspectieven voor de ontwerper. Een goed ontwerp zal zich vaak moeten richten op de toekomst en die wordt aan de hand van zulke overwegingen wel niet voorspelbaar, maar toch iets minder ondoorzichtig.

Een tweede aspect is van nog veel meer belang. Bij een gegeven technologische infrastructuur bepalen de fysische wetmatigheden de beschikbare "trade-offs",maar niet altijd is hij zich de fundamentele relaties die hieraan ten grondslag liggen bewust. Een bruikbare illustratie bieden versterkerschakelingen. Bij gegeven componenten zijn bereikbare bandbreedte en bereikbare versterking onderling sterk verweven grootheden. De beschikbare discrete of geïntegreerde componenten geven de ontwerper in eerste benadering de beschikking over een bepaalde waarde van het product dezer grootheden. Hij kan meer bandbreedte kopen tegen inlevering van versterking. Daarnaast beschikt hij over wat pasmunt in de vorm van toegeeflijkheid op het punt van overshoot, of zo men wil, fasevervorming. Deze relatie vindt haar oorzaak in fysische wetmatigheden. Elke elektronische component vertoont, alleen reeds als gevolg van zijn eindige afmetingen, de neiging tot een zekere ladingsopslag. Dit impliceert een fundamentele traagheid die zich laat vertalen in een maximaal bereikbare waarde van het product van versterking en bandbreedte. Door extra componenten in te schakelen kan de grens verlegd worden en ook hierin manifesteert zich dus een "trade-off".

Worden hoge eisen gesteld aan de lineariteit en/of de constantheid van de overdracht van een versterkerschakeling, dan biedt de toepassing van *tegenkoppeling* een voor de hand liggende remedie. Maar ook hier moet met verlies aan versterking worden betaald, welk verlies kan worden goedgemaakt door meer componenten en een hogere dissipatie te aanvaarden. Als scheiding van instelstromen en signaalstromen niet mogelijk is stuit sterke tegenkoppeling veelal op bezwaren. Dit is het geval in monolithische schakelingen waar een grote dissipatie trouwens al evenmin aanvaardbaar is. Als alternatief voor tegenkoppeling dient zich dan *compensatie* aan, waarbij de ongewenste effecten bestreden worden door ze te compenseren met even grote doch tegengesteld werkende effecten. Dit legt zware eisen op aan de *symmetrie* van de opbouw en het is een gelukkige omstandigheid dat juist de monolithische bouwwijze het mogelijk maakt deze te realiseren. Het betaalmiddel is nu de toevoeging van vele extra actieve componenten, in de monolithische techniek een courante valuta.

Wat betreft de aard der optredende niet-lineariteit: ook hier spelen fysische relaties een essentiële rol. In bipolaire schakelingen is het *exponentiële verband tussen stroom en spanning*, of zo men wil het logaritmische verband tussen spanning en stroom, de dominerende niet-lineaire relatie. Deze kan soms met voordeel worden uitgebuit, soms wordt zij echter als bijzonder storend ervaren. Zij vindt haar oorzaak in de verdelingswet van Boltzmann, een zeer fundamentele fysische relatie waaraan weinig te morrelen valt. Daar waar het verband tussen stroom en spanning echter beheerst wordt door de invloed van een elektrisch veld op een stroom van geladen deeltjes, wordt het verband tussen stroom en spanning op principiële fysische gronden beschreven door een *machtsfunctie*. De niet-lineariteit heeft hierbij dus een geheel ander karakter, dat in sommige gevallen beter past bij de wensen van de ontwerper. Alle veldeffectcomponenten, zowel buizen als veldeffecttransistoren, vertonen zulke karakteristieken. Echter, anders dan bij de bipolaire transistor, waar het exponentiële karakter van de overdrachtskarakteristieken nagenoeg niet beïnvloed wordt door de geometrie der opbouw, is de aard van de machtsfunctie die het gedrag van een veldeffectcomponent beheerst, sterk afhankelijk van de geometrie der opbouw, aangezien deze immers de veldstructuur bepaalt. Dit biedt de ontwerper van zulke componenten enerzijds de mogelijkheid de karakteristieken een bepaalde vorm te geven, anderzijds heeft het de onprettige consequentie dat verschillen in geometrie leiden tot relatief grote verschillen in de elektrische parameters. En dat maakt de toepassing van op symmetrie berustende compensatie-

technieken weer moeilijker. De ontwerper die zich zulke fundamentele wetmatigheden niet bewust is kan ook de hem ter beschikking staande trade-offs niet behoorlijk overzien. Het wordt hem dan moeilijk, zo niet onmogelijk, zijn ontwerp te optimaliseren.

Om nog even bij onze als voorbeeld gekozen versterkerschakelingen te blijven: een ander aspect van deze schakelingen is de bereikbare gevoeligheid. Deze wordt begrensd door de fundamenteel onvermijdelijke *ruis*. Het zou thans te ver voeren de principiële wetmatigheden die hierin beslissend zijn, uitgebreid aan de orde te stellen. Dat hier de voor de ontwerper beschikbare mogelijkheden zeer geprononceerd beheerst worden door fundamentele fysische wetmatigheden zal een ieder die zich ooit enigszins indringend met ruisproblematiek heeft beziggehouden, beamen.

3. TECHNOLOGISCHE BEPERKINGEN

Komen we vervolgens tot onze tweede rubriek: de technologische "constraints". In deze categorie vallen de beperkingen die hun oorzaak vinden in de beschikbare technologische hulpmiddelen. Het zijn deze beperkingen die, samen met de in de derde rubriek genoemde economische beperkingen, in veruit de meeste gevallen de actuele ruimte voor de ontwerper vastleggen. Het zijn ook deze beperkingen die meer dan welke andere ook de praktische verschijningsvormen van de voortbrengselen der elektronica beïnvloeden. Leggen de fysische beperkingen absolute grenzen vast, de door technologische en economische beperkingen bepaalde grenzen verschuiven voortdurend. Dit dwingt de ontwerper van elektronische apparatuur steeds op de hoogte te blijven van de technologische ontwikkeling terwijl hij tevens voortdurend zijn kostenbesef moet corrigeren. Vele functies die, zeg 10 jaar geleden, praktisch niet realiseerbaar leken wegens hun complexiteit of wegens de onmogelijkheid voldoende bedrijfszekerheid in het ontwerp in te bouwen, worden thans zelfs niet meer als een uitdaging aan de techniek gezien. De zich uitbreidende technologische middelen, in het bijzonder de integratietechnieken, en de afnemende kosten van complexe hardware zijn er ook de oorzaak van dat de elektronica in staat is door te dringen in gebieden waarin voorheen alternatieve technische middelen domineerden. In het bijzonder oefent de elektronica thans druk uit op terreinen waar van ouds mechanische en elektromechanische middelen de favoriete implementatiestructuren aanreikten. De gevolgen hiervan voor de betrokken bedrijfstakken zijn verstrekkend, omdat een in decennia of zelfs eeuwen opgebouwde traditie geen houvast meer biedt. Men denke aan alle vormen van reken- en telapparatuur, aan uurwerken, weegwerktuigen, schakelapparatuur, auto-accessoires.

Typerend voor de technologische randvoorwaarden is, het werd reeds opgemerkt, dat ze geen absolute grenzen vastleggen. Men kan zeggen dat het ook in de tijd van de elektronenbuizen in principe mogelijk was een zeer grote computer te bouwen. Deze zou dan echter zeer veel ruimte innemen, zeer veel energie verbruiken en bijna altijd in reparatie zijn. Eerst de komst van nieuwe technologische mogelijkheden maakte het ontwerp van zo'n installatie praktisch zinvol.

4. ECONOMISCHE RANDVOORWAARDEN

De derde categorie van randvoorwaarden, de *economische beperkingen* hangt sterk samen met de technologische beperkingen. Of een ontwerpbaar product economisch aanvaardbaar is wordt voor een belangrijk deel bepaald door de kostprijs en deze is zeer sterk afhankelijk van de gebruikte technologische middelen. De economische randvoorwaarden worden daarnaast beheerst door factoren die niet door de technologische mogelijkheden bepaald worden. Een autonome rol wordt gespeeld door maatschappelijke opvattingen en modetendenties. Een toepassingsveld waar zich deze aspecten typisch doen gevoelen is dat van de medische elektronica. De elektronica is in staat apparatuur voor alle mogelijke diagnostische en therapeutische doeleinden te realiseren. Hoeveel van zulke apparatuur gevraagd wordt en welke eigenschappen deze moet hebben, wordt mede bepaald door de maatschappelijke opvattingen over de wenselijkheid van bepaalde voorzieningen. Hoeveel we willen investeren in bijv. intensive-care units voor cardiologische centra, in röntgenapparatuur, in computers voor ziekenhuizen, hangt af van de betekenis die we hechten aan de beschikbaarheid van dit type voorzieningen. De ontwerper van elektronische apparatuur heeft in zijn specifieke ontwerpactiviteit slechts zijdelings met deze problemen te maken. Als ontwerper zal hij het als zijn taak zien het gevraagde zo goed mogelijk te realiseren. Toch mag hij zich om twee redenen niet afsluiten voor deze problematiek. In de eerste plaats is hij als lid van de gemeenschap mede verantwoordelijk voor de vaststelling van maatschappelijke prioriteiten en de ontwikkeling van maatschappelijke tendenties. In de tweede plaats dient hij de gemeenschap waar hij deel van uitmaakt als deskundige te attenderen op wat er mogelijk is en tegen welke kosten. Sterker nog dan bij de ontwikkeling van medische apparatuur spreekt de maatschappelijke context bij de ontwikkeling van apparatuur voor militaire doeleinden. Zo ergens, dan loopt de ontwerper hier zelfs het risico in gewetensnood te geraken wanneer zijn persoonlijke opvattingen ter zake van het dienstbaar maken van technische kennis aan de militaire inspanning in conflict zijn met die van de maatschappelijke structuur waarin hij participeert. Ik ben met velen van mening dat deze problematiek ernstig dient te worden genomen en dat de technicus niet alleen moet worden *toegestaan* zich op deze kanten van zijn functie te bezinnen maar dat dit zelfs

nadrukkelijk van hem *geëist* moet worden. Het moet m.i. dan ook positief gewaardeerd worden dat de jonge generatie van technici zich op dit punt kritisch opstelt en zich, meer wellicht dan dit in vroeger tijden het geval was, de eigen invloed en de eigen verantwoordelijkheid ter zake bewust is.

Andere vragen in deze sector betreffen de verantwoording van het beslag dat een bepaalde technische ontwikkeling legt op schaarse middelen, in het bijzonder grondstoffen en energie. Het wil mij voorkomen dat de elektronica in dit opzicht past in de natuurlijke en de maatschappelijke evolutie. De elektronica voorziet in de essentiële behoefte aan communicatie en informatiebeheersing in een door haar omvang zeer complex geworden samenleving en zij doet dit met relatief zeer bescheiden aanspraken op schaarse materialen. Van de op dit moment voor de elektronica zo belangrijke grondstoffen silicium en aluminium, zijn onuitputtelijke voorraden beschikbaar. Ook ten aanzien van het energieverbruik is moderne elektronische apparatuur zeer bescheiden, al moet gezegd worden dat de voor de produktie van deze apparatuur benodigde energie aanzienlijk kan zijn, hetgeen de ontwerper de verantwoordelijkheid oplegt te streven naar een lange levensduur van zijn voortbrengselen.

5. ERGONOMISCHE RANDVOORWAARDEN

Vervolgen wij nu onze verkenning van de eerder gerubriceerde algemene randvoorwaarden, dan treffen we als volgende categorie de *ergonomische* randvoorwaarden aan. Hier behoeft niet veel over te worden opgemerkt. De consequenties van dit veld van beperkingen zijn betrekkelijk triviaal. Technische voortbrengselen, de elektronische niet uitgezonderd, moeten door mensen worden gebruikt en bediend. Dit vraagt aanpassing aan de menselijke mogelijkheden en vaardigheden. Een piano, of deze nu met mechanische of met elektronische middelen geïmplementeerd wordt, kan niet kleiner gemaakt worden dan het klavier waarmee hij bespeeld wordt: de afmetingen der toetsen worden bepaald door de structuur van de menselijke hand, hun aantal door de eigenschappen van het menselijk gehoororgaan. Een rekenmachine moet via door de menselijke vingers te bedienen toetsen worden bestuurd. Soortgelijke opmerkingen zijn te maken over communicatie-apparatuur, over meetapparatuur, enz. Met name bij complexe apparatuur met complexe bedieningseisen zijn de consequenties van de ergonomische aspecten niet altijd zo triviaal. De functionaliteit van technische voortbrengselen kan bij onvoldoende zicht op de ergonomische aspecten ernstig in de knel komen en de ontwerper dient zich dit wel bewust te zijn.

6. HISTORISCHE RANDVOORWAARDEN

De laatste categorie van randvoorwaarden, in ons overzicht aangeduid als *historische randvoorwaarden*, hier wellicht beter aan te duiden als *beginvoorwaarden*, is wellicht het moeilijkst van alle te overzien. Deze problematiek heeft verscheidene facetten. In de eerste plaats wordt de ontwerper gebonden door het feit dat zijn nieuwe ontwerp in vele gevallen moet passen in een reeds bestaand elektronisch systeem. Evidente voorbeelden van gevallen waarin deze eis van *verenigbaarheid* of *compatibiliteit* met een bestaande infrastructuur de ontwerpvrijheid in belangrijke mate beperkt, treft men aan in de communicatietechniek. Modulatiemethoden die zijn gekozen op grond van overwegingen ontleend aan een achterhaalde technologische basis, kunnen niet dan met grote moeite veranderd worden. De eigenschappen van bestaande apparatuur zijn in hoge mate tevens bepalend voor de eigenschappen van de te ontwerpen nieuwe apparatuur. Typische voorbeelden levert de omroeptechniek. Het is goed lering te trekken uit het verleden en te bedenken dat wat nu heden is in de toekomst verleden zal zijn. Wat wij nu aan systemen en apparaten ontwerpen en in gebruik nemen is beslissend voor de wijze waarop we straks van nieuwe technologische mogelijkheden gebruik kunnen maken. Door de ervaring op dit punt wijs geworden realiseren we ons dit ook wel, hetgeen overigens het nemen van verantwoorde beslissingen er niet eenvoudiger op maakt, getuige o.a. de meningsverschillen ten aanzien van de te kiezen configuratie van breedbandige kabelnetten voor t.v.-distributie etc.

Of we dit nu betreuren of niet: historische gebeurtenissen hebben een zeer grote invloed gehad op de weg die de elektronica gegaan is. Hoe zou de elektronica zich ontwikkeld hebben als niet de elektronenbuis, maar de transistor de eerste bruikbare actieve component zou zijn geweest? Het opwekken van grote hoogfrequentvermogens zou dan heel lang een probleem zijn geweest en het is niet waarschijnlijk dat dan de omroeptechniek bijna twintig jaar het belangrijkste draagvlak van de ontwikkeling zou zijn geweest. Niet alleen zou de ontwikkeling van het vak zeker anders verlopen zijn, ook de maatschappelijke invloed van deze ontwikkeling zou van een heel andere aard zijn geweest!

Een tweede facet van de binding aan de historie grijpt, weliswaar veelal ongemerkt, nog veel dieper in de werk- en denkwijze van de elektronische ontwerper in, nl. het feit dat het denken zelf van de ontwerper zich gevormd heeft in contact met de techniek van het verleden. Hij heeft zijn opleiding ontvangen en zijn eerste schreden op het pad van de praktische techniek gezet in een tijd waarin de techniek een geheel ander aanzien had. De elektronicus die zijn opleiding ontving in de buizentijd heeft zowel de omschakeling op de transistortechniek als

de omschakeling op de IC-techniek moeten volbrengen. Wie het meegemaakt heeft weet wat dit betekent. Het kan geen verbazing wekken dat de eerste transistorschakelingen min of meer copieën waren van overeenkomstige buisschakelingen en dat de eerste IC's (zowel digitale als analoge) eigenlijk geïntegreerd uitgevoerde discrete schakelingen waren. De eigensoortige mogelijkheden van de nieuwe technieken kwamen eerst na een enkele jaren vergende technische puberteit tot ontplooiing. Er is waarschijnlijk geen terrein van technische activiteit aan te wijzen waarin de veranderingen groter zijn geweest dan dat der elektronica. Denk- en werkschema's die vroeger stevig houvast boden moesten in een vaak moeizame ontwenningskuur afgeleerd worden. Vele als fundamenteel ervaren concepties bleken vroeg of laat toch herzien te moeten worden. Ontwerpen in eigentijdse techniek vraagt van de ontwerper een zich volledig oriënteren op de daaraan ten grondslag liggende concepties en dit vereist een zeer soepele geest en een zeer kritische instelling. De jonge ontwerper die niet belast is met een technisch verleden lijkt hierbij in het voordeel te zijn. Of dit werkelijk zo is, is nog de vraag. Wie de souplesse opgebracht heeft om enkele malen zijn denkwijze opnieuw te structureren kan vermoedelijk wat beter afstand nemen van modeverschijnselen en al te gemakkelijk aansprekende "derniers cris".

Wat moet de practiserende elektronicus ondernemen tegen verstarring van zijn denkschema's? Het is duidelijk dat hij allereerst zal moeten zoeken naar echt fundamentele principes: waarheden die invariant zijn tegen de wisselingen der technologische infrastructuur. Vaststellingen die steunen op primaire natuurwetten of op onloochenbare mathematische relaties mogen in dit opzicht natuurlijk als harde valuta worden aangemerkt. Het onderscheiden van echte en halve waarheden vereist echter veel kritische zin. Aan de juistheid van de bewering dat versterking bij elk signaaltransport een essentiële functie is omdat ruis en dissipatie fundamentele eigenschappen van natuurlijke systemen zijn zal niemand twijfelen. Deze bewering houdt stand. Maar vele schijnbaar harde beweringen blijken achteraf discutabel te zijn. Toen de transistor zich als versterkingselement aandiende als alternatief voor de elektronenbuis was het al spoedig duidelijk dat het nieuwe element de potentie had het oude in vele toepassingen te gaan verdringen. Maar, zo zei men: een fundamenteel nadeel is dat de driftsnelheid van ladingsdragers in de vaste stof wegens de aanwezigheid van het kristalrooster nooit de waarde kan bereiken die in vacuüm mogelijk is en dus zullen we voor typische hoogfrequenttoepassingen op de buis aangewezen blijven. Het zwakke punt zit hier in het "dus". Wie bracht in het begin der jaren vijftig de fantasie op om te beseffen dat de technologische beheersing van de halfgeleidermaterialen het mogelijk zou maken de effectieve basisbreedte van transistoren zo gering te maken dat de looptijd van ladingdragers ondanks de geringere snelheid toch kleiner zou kunnen zijn dan in buizen? Curieus is dat tegen elke verwachting in de eerste transistoren in t.v.-ontvangers toegepast werden in de tuner! Een andere algemene bewering: npn-transistoren zullen bij gelijke geometrie altijd betere h.f.-eigenschappen hebben dan pnp-transistoren, want de beweeglijkheid van elektronen in groter dan die van gaten. Een fundamenteel gegeven, maar niet altijd beslissend. In bepaalde omstandigheden blijkt dat het voordeel van de geringere basisweerstand van de pnp-transistor het nadeel van de geringere diffusiesnelheid der minderheden meer dan compenseert! Ook de schijnbaar zeer solide regel dat voor een goede stroomversterking de emitterdotering veel hoger moet zijn dan de basisdotering is de laatste tijd gebleken slechts onder bepaalde voorwaarden een juist uitgangspunt te zijn.
Een eveneens zeer courante stelling is deze: van de frequentie niet afhankelijke tegenkoppeling heeft op de signaal-ruisverhouding geen invloed, want signaal en ruis ondergaan dezelfde invloed van de tegenkoppeling. Wie ooit te maken heeft gehad met het ontwerpen van ruisarme versterkers weet dat deze bewering niet volledig is en daardoor gemakkelijk aanleiding kan geven tot dubieuze ontwerpen. Zonder moeite zou het aantal voorbeelden van schijnbaar solide, doch in werkelijkheid zeer betrekkelijke stelregels nog met vele te vermeerderen zijn.

Nog op een ander punt wordt het denkvermogen van de elektronicus telkens op de proef gesteld. Vele verschijnselen laten zich vanuit verschillende beschouwingswijzen beschrijven. De alternatieven zijn complementair, doch de efficiëntie der redenering via de onderscheidene denkpatronen kan dramatisch verschillen. Typische voorbeelden: corpusculaire beschouwingen versus golfbeschouwingen, beschouwingen in het tijdsdomein versus het frequentiedomein, beschouwingen aan de hand van velden versus stromen en spanningen. Dit zijn alle niet alleen evergreens in de discussie tussen theoretici, maar ook struikelblokken voor praktische ontwerpers. Eén voorbeeld zij in dit verband genoemd: de ontwikkeling van systemen voor de overdracht van kleurentelevisiesignalen heeft geruime tijd gestagneerd door te sterk op analyse in het tijdsdomein georiënteerde optimaliseringsbeschouwingen die, naar achteraf bleek, in dit geval een onhandige keus waren.
Soms blijken alternatieve denkwijzen met vergelijkbare souplesse tot eenzelfde resultaat te voeren. Een curieus en recent voorbeeld biedt de *injectielogica*, die onafhankelijk in een andere denksfeer tot ontwikkeling kwam vanuit de idee logica-schakelingen op te bouwen uit een mengsel van pnp- en npn-structuren. Wat op deze basis ontwikkeld werd onder de naam *"merged transistor logic" (MTL)* bleek dezelfde structuur op te leveren als de langs geheel andere weg gevonden injectielogica.

7. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Het voorgaande samenvattend komen we tot de volgende conclusies:

a) De grenzen van het mogelijke worden bepaald door de natuurwetten. Ontwerpen op het hoogste niveau vereist om deze reden een zeer grondig fysisch inzicht, mede omdat wanneer de fysische grenzen nog buiten de horizon van het praktisch bereikbare liggen, de beschikbare trade-offs toch beheerst worden door fysische relaties.
b) De beschikbare technologie bevindt zich in een voortdurende evolutie. De ontwerper moet niet alleen over up-to-date kennis beschikken, maar ook visie ontwikkelen op wat in de toekomst te verwachten zal zijn.
c) De ontwerper dient zich bewust te zijn van zijn maatschappelijke functie als deskundige op zijn vakgebied. Hij is eerder dan de niet vaktechnisch geschoolde in staat positieve en negatieve maatschappelijke toepassingen van zijn vak te signaleren. Hij dient bovendien oog te hebben voor de economische consequenties van zijn handelen en voor de invloed van technologische ontwikkelingen daarop.
d) Hij dient zich bij zijn ontwerpen steeds de gebruiker van zijn voortbrengselen voor ogen te stellen en zich te oriënteren op diens behoeften en eigenschappen.
e) Hij dient te beseffen dat wat hij in het heden maakt aansluiting moet vinden bij wat in het verleden gemaakt werd en wat in de toekomst gemaakt zal worden. Met andere woorden: hij dient historisch besef te paren aan toekomstvisie.
f) Hij moet zijn denkwijzen voortdurend kritisch onderzoeken en bereid zijn stellingen die de toets van zijn kritiek niet kunnen doorstaan, te verlaten. Zijn denken moet in hoge mate flexibel zijn.

Dit alles overziende moeten we wel tot de conclusie komen dat de elektronisch ontwerper een universeel mens moet zijn die niet alleen moet beschikken over een grote mate van kundigheid op zijn eigenlijke vakgebied, maar ook over een brede visie op terreinen die daar ver buiten liggen. Dit beeld van de ideale ontwerper van elektronische apparaten en systemen reikt ook de blauwdruk voor zijn opleiding aan. Aan de opleider zal men geen geringere eisen kunnen stellen dan aan degene die opgeleid wordt. Ideale ontwerpers bestaan niet, ideale opleiders evenmin. Maar er is al heel wat gewonnen als beiden zich bewust zijn van hun beperkingen enerzijds en hun roeping anderzijds.

Men kan terecht opmerken dat deze bijdrage niet veel nieuwe gezichtspunten heeft gebracht. De schrijver gelooft niettemin dat het zin heeft nu en dan te proberen datgene waarmee men dagelijks bezig is in een wat wijder verband te zien. Meer dan dat pretendeert deze bijdrage dan ook niet te geven.

Voordracht gehouden 21 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

DE AMBIANCE VAN AUTO-ELECTRONICA

Ir. H.G. Bruijning
Philips Natuurkundig Laboratorium

The introduction of electronics in a car is largely influenced by the stringent requirements the electronics has to fulfill.
The paper deals with the questions in how far and in what shape these requirements are available already. Functions essential to the use of a car only are dealt with.

INLEIDING

Electronische - en auto-industrie groeien naar elkaar toe. Enerzijds zijn in de electronische industrie halfgeleiders ontwikkeld die geschikt zijn om in een auto gebruikt te worden voor essentiële functies - brandstofinjectie, ontsteking e.d. - anderzijds worden hogen eisen gesteld aan de uitlaatgassen i.v.m. milieu eisen. In onze beschouwing zullen we achtereenvolgens betrekken: eenvoudige functies - ontsteking - luchtvervuiling - motorgedrag en beheersing van het verbrandingsproces, waarna de specifiek electronische ambiance en conclusies volgen.

1) Eenvoudige functies

De eerste functies die men aan electronica wil toevertrouwen zijn gewoonlijk die waarin electrische schakelcontacten gebruikt worden, zie fig. 1.

	halfgeleider	contact
werkwijze	analoog	digitaal
te schakelen vermogen	hoog	hoog bij langzaam schakelen laag bij snel schakelen
overlijdensbeeld	plotseling	langzame verzieking
onderhoud	geen	af en toe controle of vervangen
precisie van timing	hoog	laag
flexibiliteit	hoog	laag

Vergelijking contacten versus halfgeleiders

fig. 1

Het overlijdensbeeld is belangrijk bij het onderbrekercontact (ontsteking). We vinden daar een hoge stroomsterkte, een hoge verbreekspanning en de eis van nauwkeurige timing, die leidt tot een licht en klein bewegend deel van het onderbrekercontact.

Wanneer dit contact zijn levenseinde nadert treedt een merkbaar slechter functioneren van de motor op, waardoor vervangen mogelijk is voordat het contact geheel overlijdt.

Bij strenge milieu eisen is dit langzaam achteruitgaan van motorafstelling niet toelaatbaar, en is electronisch ontsteken een functionele vooruitgang, die geld waard is.

Bij minder hoog belaste contacten (knipperlicht, regeling generatorvermogen) zijn prijs en precisie van overwegend belang.

De autoindustrie zal bij de essentiële functies ze... zorgvuldig te werk gaan en na uitgebreide betrouwbaarheidsproeven strenge eisen aan de schakelingen stellen.

2. Luchtvervuiling

Naar aanleiding van de luchtvervuiling in Los Angeles zijn door de regering van de U.S.A. eisen voor auto's opgesteld die ongeveer op het volgende neer komen:

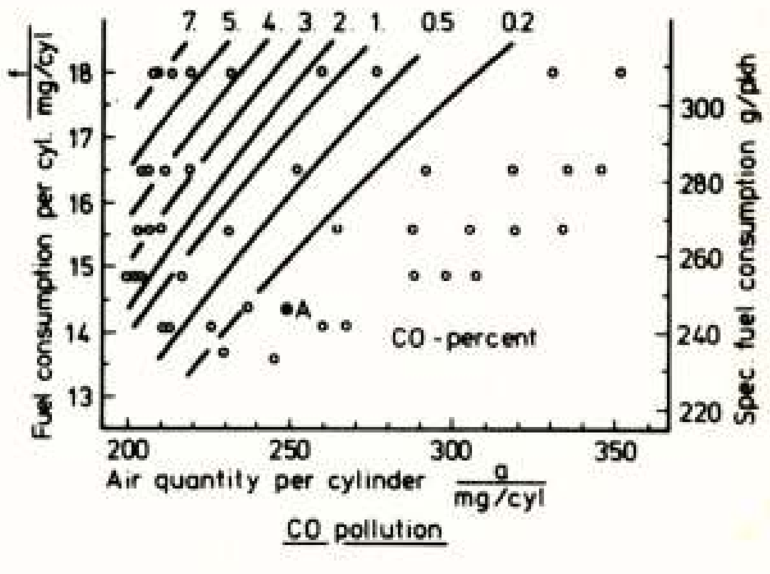
a) reductie van uitworp van CO, CHx en NOx met een factor 10
b) dit mag geen aanleiding geven tot andere verontreinigingen
c) de auto moet 50.000 mijl aan deze eisen blijven voldoen bij voorgeschreven (minimaal) onderhoud
d) bij overtreding betaalt de fabrikant boete.

Bovendien zal de autobezitter eisen, dathet rijgedrag goed blijft. Deze eisen waren zo zwaar dat 2 dingen wel duidelijk waren:

1) de ontsteking moet a) nauwkeurig getimed blijven
b) geen enkele vonk mag ontbreken
2) een anlyse van het motorproces was nodig.

ANALYSE MOTORPROCES

Aan de motor wordt op ieder moment de eis gesteld dat bij een gegeven toerental een gewenst koppel wordt afgegeven. Voor één koppel en één toerental gaan we na hoe rendement en uitlaatgassen variëren wanneer we variaties in brandstofmengsel en ontsteekmoment aanbrengen. zie fig. 2, 3 en 4:



CO pollution

fig. 2

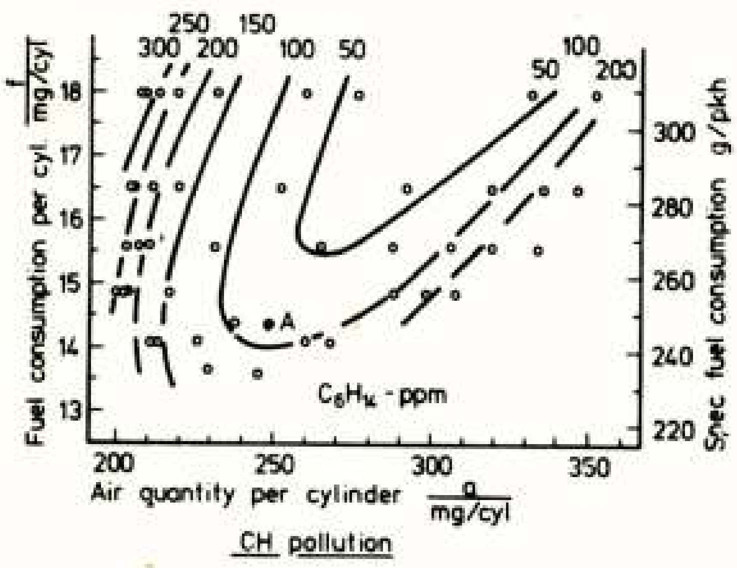


fig. 3

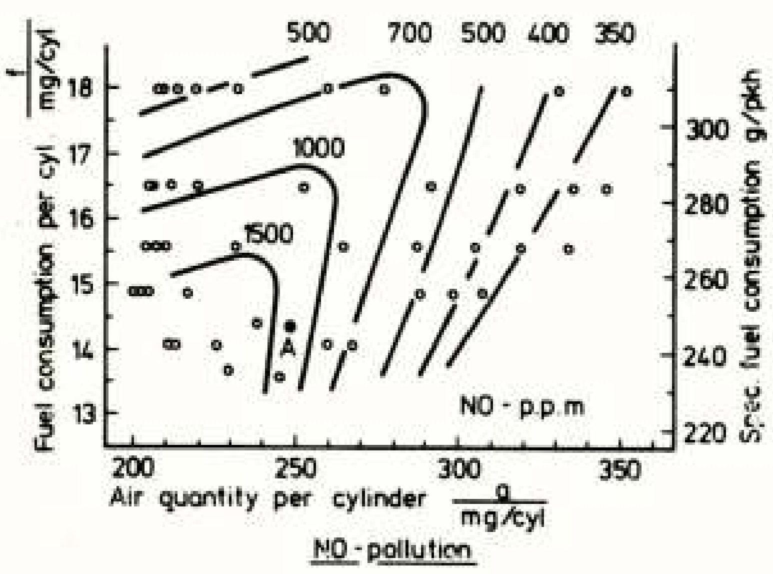


fig. 4

we zien dan

1) het CO-gehalte is bij arme mengsels goed
2) het CHx-gehalte is bij matig arme mengsels goed
3) het NOx gehalte is bij rijke en zeer arme mengsels goed.

In fig. 5 is dat nog eens aangegeven:

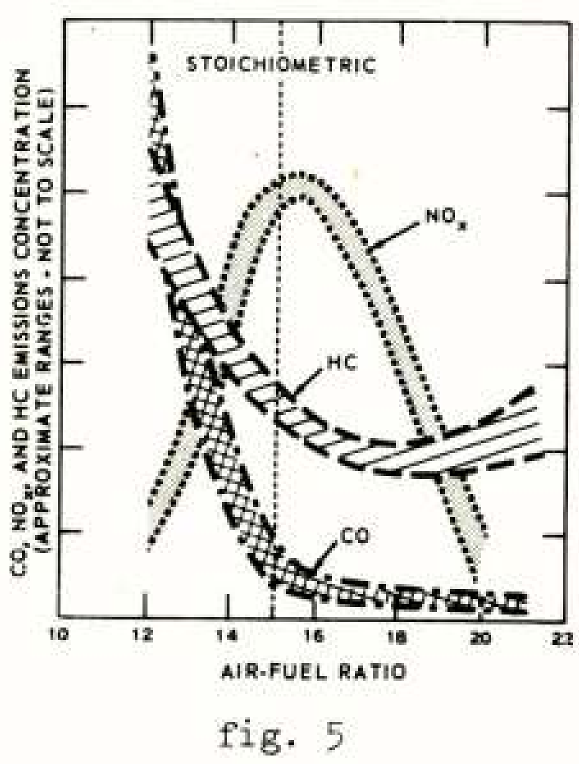


fig. 5

Voor andere koppels en toerentallen vinden we soortgelijke krommen die natuurlijk net iets anders liggen en daardoor het vinden van een compromis bemoeilijken. Afhankelijk van de lucht-brandstof verhouding zijn er verschillende manieren om de uitlaatgassen te verbeteren:

a) rijke mengsels kunnen in een naverbrander, onder toevoegen van lucht, verbrand worden tot CO_2 en H_2O. Hierbij hoeft de in de cylinder aanwezige mengsel niet nauwkeurig van samenstelling te zijn; er is wel een groot rendements verlies.

b) wanneer we een nauwkeurig stoichiometries mengsel hebben, kunnen CO en NO in een katalytische naverbrander reageren tot CO_2 en N_2. Dit vereist een zeer nauwkeurige brandstofbereiding en geeft ook rendementsverlies (tegendruk in naverbrander, en geen optimaal mengsel wat rendement betreft.)

c) Bij matig arme mengsels vinden we een hoog NOx gehalte door een combinatie van hoge verbrandingstemperatuur en overmaat O_2, een serie maatregelen zijn daarvoor voorgesteld;

1) Recirculatie van uitlaatgas en waterinjectie
2) Laat ontsteken
3) Stratificatie, waar we verderop op zullen terugkomen.

Bij 1) wordt het mengsel verdund zonder toevoeging van O_2.
Bij 2) wordt voorkomen dat reeds ontstoken mengsel gecomprimeerd wordt.

De invloed van het ontsteekmoment op de max. temperatuur wordt getoond in fig. 6, waar voor 10° resp. 30° voorontsteking uitgerekende krommen zijn gegeven die op verschillende tijden het temperatuur verloop over de cylinder weergeven, voor een hypothetisch stoichiometries mengsel.

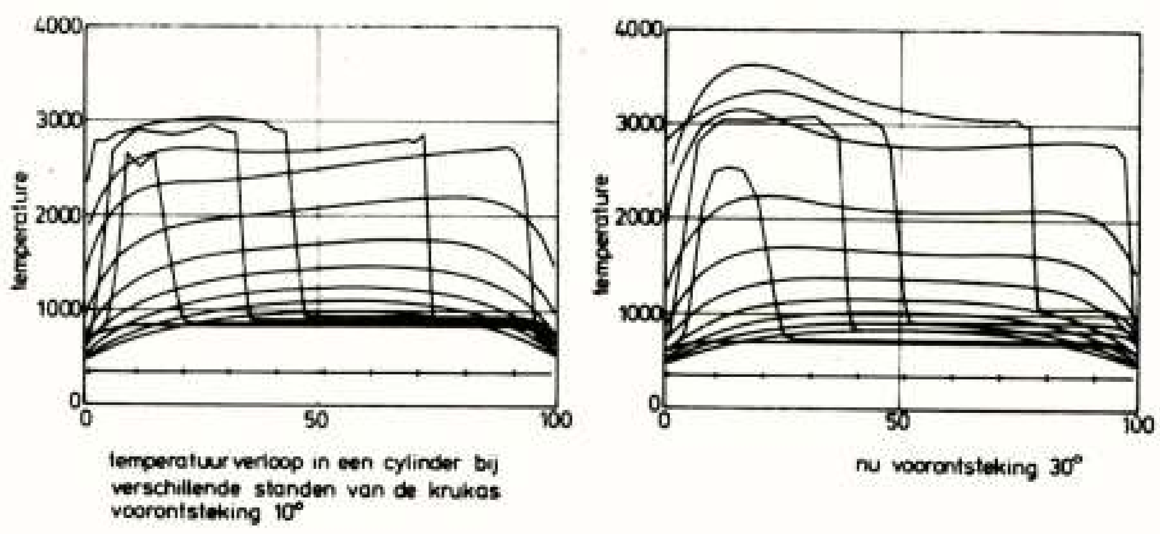


fig. 6

Hoe ver kunnen we gaan met verarming?

We zullen uitgaan van een gestyleerde vlam, waarin de vlamreacties beginnen bij de temperatuur $T_{vlam\ begin} = T_{vb}$. Een goed brandende vlam in een goed gemengd mengsel zoals in een otto-motor aanwezig is vertoont het volgende profiel: (fig. 7);

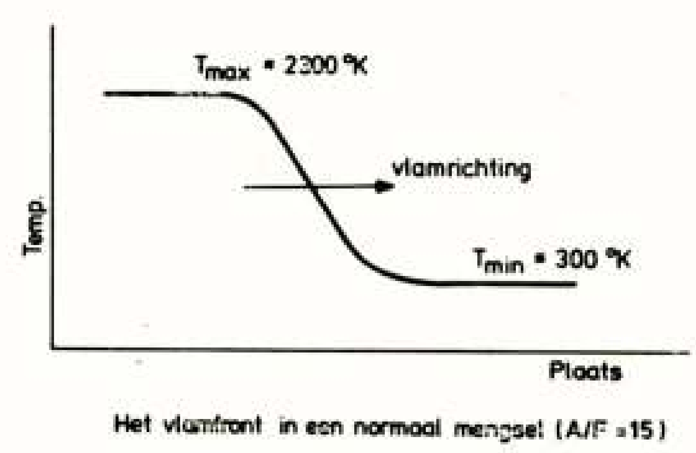


fig. 7

Als eenvoudig criterium voor brandbaarheid kunnen we aangeven dat een vlam zich kan voortplanten wanneer

$$T_{vb} < (T_{max} + T_{min})/2.$$

Voor T_{min} = 300° K en een T_{vb} van 1100° K vinden we dan: T_{max} moet minimaal zijn : 1900° K.
Wanneer we dat vergelijken met een normale vlamtemperatuur van 2300° K, is het duidelijk dat de mate waarin we de vlamtemperatuur ongestraft kunnen beperken, niet ruim is. Dicht boven de minimale temperatuur is er een duidelijke afname van de vlamsnelheid, die in de motor gecompenseerd kan worden door vervroegen van de ontsteking. Dit heeft weer twee gevolgen; ten eerste vindt de ontsteking dan plaats in een mengsel dat minder gecomprimeerd, dus kouder is; ten tweede wordt het vlambegin na verbranding nog gecomprimeerd, wat aanleiding geeft tot een plaatselijk hoge temperatuur.
De vlamkern kan ook gedurende zijn ontwikkeling een instabiele fase doorlopen, die we bij een ruimtevlam als volgt zien verlopen: (fig. 8)

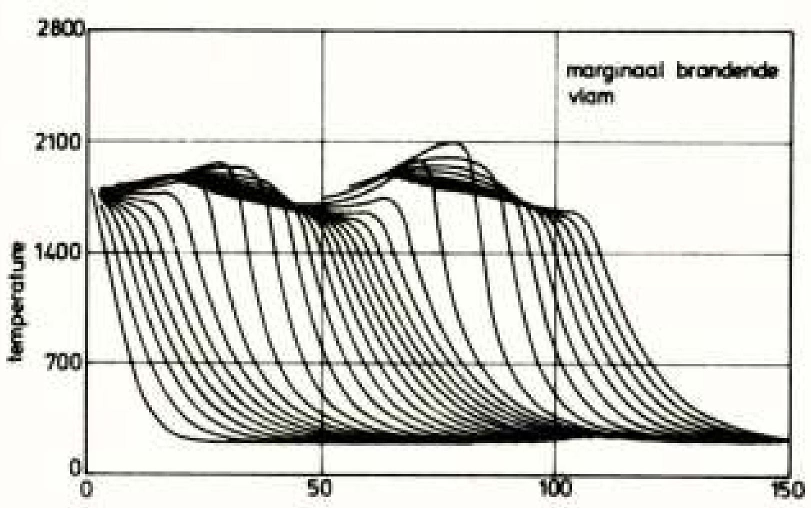


fig. 8

Het resultaat van deze toestanden is dat we bij vroege ontsteking van arme mengsels een van cylindervulling tot cylindervulling varieerend verbrandingsverloop kunnen vinden.

We komen zo tot de volgende wensen waaraan het verbrandingsproces zou moeten voldoen:

1) hogere vlamsnelheid
2) late ontsteking

Men kan zoiets realiseren door de mengverhouding van de plaats in de cylinder af te laten hangen; een z.g. stratified proces. Men ontsteekt dan in een rijk mengsel, waarna de rest van de cylinder inhoud- b.v. via turbulentie- zo ver wordt verwarmd dat daar een snelle verbranding in -een zeer arm mengsel mogelijk is. Veel firma's publiceren tegenwoordig onderzoekingen in die richting; de Honda "Civic" is een practisch voorbeeld, (fig. 9)

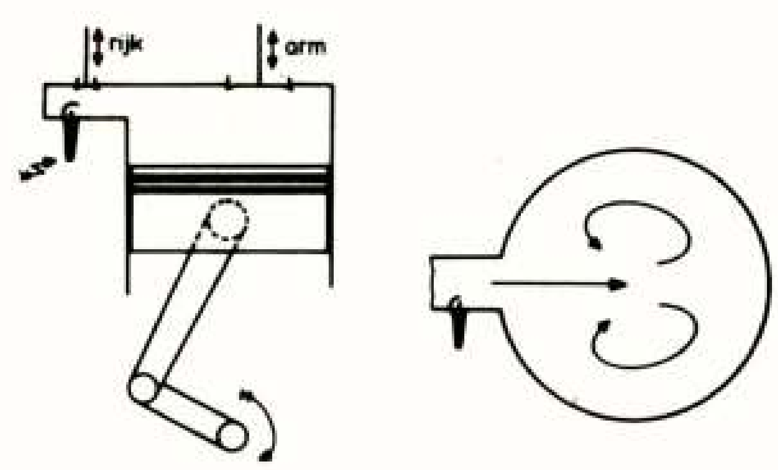


fig. 9

dat nogal een schok teweegbracht in de auto-industrie. Zulke schokken zijn ook in de toekomst niet onmogelijk, en kunnen een hele lange-termijnplanning van een industrie in de war brengen.
Een klasse van problemen die we hier alleen willen aanstippen vindt zijn oorzaak al voor het mengsel in een cylinder terecht komt; het betreft de verdeling van brandstof en van lucht over de cylinders en de dispersie van brandstof in de lucht.
Een grote rol speelt bij deze problemen de vorm waarin het brandbaar mengsel door het spruitstuk wordt getransporteerd; het bestaat gedeeltelijk uit damp, gedeeltelijk uit vloeibare benzine. Vooral de laatste genoemde fractie maakt dat veranderingen in benzine hoeveelheid later bij de inlaatkleppen arriveren dan veranderingen in de luchthoeveelheid. We kunnen dat zien in fig. 10:

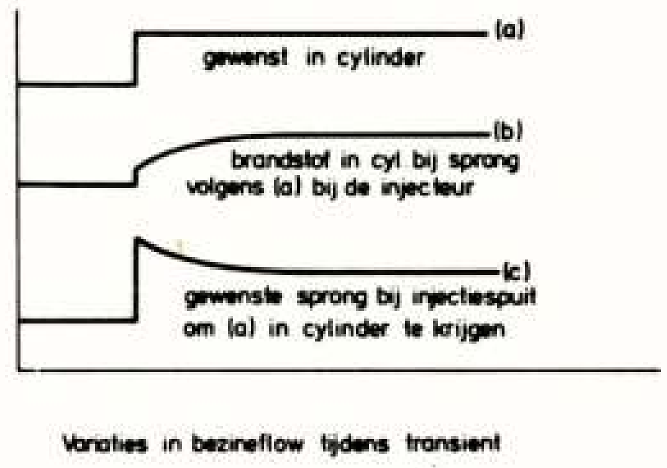


fig. 10

De carburator kan slechts een grove benadering van deze krommen leveren.

NOODZAKELIJKE PRECISIE VAN DE BRANDSTOFDOSERING

Een doseringssysteem zal altijd moeten bestaan uit 2 delen;

a. meten van de aangezogen lucht
b. doseren van de gewenste benzine
terwijl eventueel een ijkingssysteem als 3^e^ component kan toegevoegd worden.

a) meten van de lucht

De aangezogen lucht is pulserend en varieert (bij afgevlakte pulsaties) een factor 30 tussen nullast en vollast (vol/seconde) (combinatie van vullings - en toerental variaties). Bij een nullastprecisie van 10% betekend dit een meetnauwkeurigheid - inclusief nulverloop- van 3 0/00. Dat is een zeer hoge eis, vooral voor lange-termijnprecisie.

b) bij het doseren kan men in principe kiezen tussen een continue en een gepulste brandstofdosering.
De gepulste toediening eist een minder hoge precisie dan de luchtmeting, omdat de hoeveelheid benzine per slag slechts een factor 6 varieert.
De precisie moet dan ongeveer 1.6% zijn
(10% van de nullastvulling van 16%). Ook dit is een hoge eis, zowel voor de doorlaattijd(elektrisch) als voor de

stromingsweerstand van de doseringsklep.

DE SPECIFIEK ELECTRONISCHE AMBIANCE

Tot nu toe zijn van de eisen die aan de appratuur gesteld worden, alleen de wenselijkheid van toepassing, de nauwkeurigheid en de prijs ter sprake gekomen. We komen nu toe aan aspecten van de technische realisering.

1) Betrouwbaarheid:

Het onderhoud moet mininaal, liefst nul, zijn en het verloop van de ingesteld functies moet binnen de toleranties blijven. Dit geldt natuurlijk ook voor sensoren, injectieventielen e.d.

2) Afscherming

Ontsteking, laadgelijkrichters en generatorregeling kunnen sterke storingen afgeven; bovendien is het gebruik van afgeschermde pluggen en kabels bezwaarlijk in een omgeving waar veel met hamers gerepareerd wordt. Het is daarom gewenst schakelingen te gebruiken die intrinsiek weinig gevoelig voor storingen zijn.

3) Temperatuurgevoeligheid:

De apparatuur moet starten en opwarmen van -30° C af toelaten; aan de precisie eisen moet snel na de start tot 90°-120° voldaan worden.

4) Storingen door defecten in voeding:

Bij onoordeelkundig lostrekken van draden, bezwijkende accu en/of kapotte regelaars kunnen op de voedingsklem spanningen verschijnen van meer dan 100V, of van verkeerde polariteit. Daarbij moeten de schakelingen niet kapot gaan.

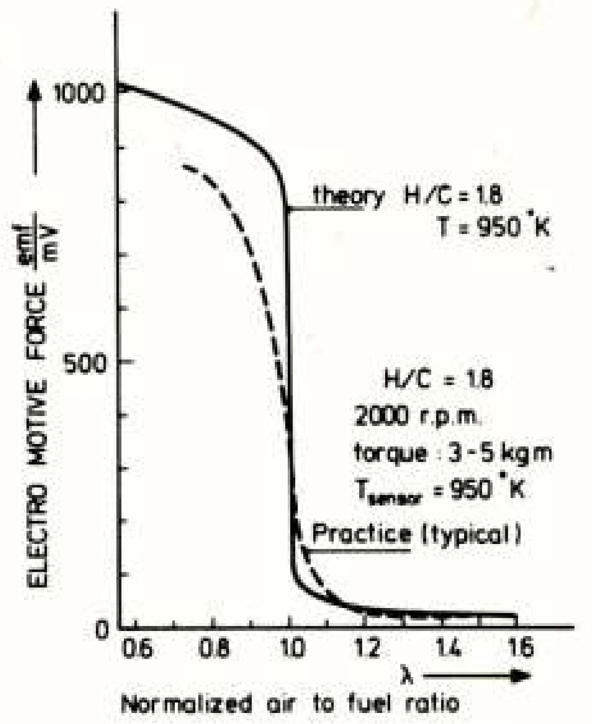
5) Bij koude start is een spanningsdaling tot de helft van de nominale accuspanning mogelijk; bij laden een stijging van b.v. 30% daarboven.

6) Een grote mate van trillingsbestendigheid is uitteraard gewenst.

7) Zowel sensoren, signaalverwerking als injectieventielen kunnen langzaam verlopen. Een terugkoppeling gekoppeld aan een uitlaatgasmeting kan hier verbetering geven. Men kan voor zoiets een schijfje zirkoonoxyd gebruiken, dat, op de juiste wijze geactiveerd, zuurstofionengeleiding vertoond en dan een spanning kan afgeven

$$e_{p1} - e_{p2} = \frac{T}{20} \ln \frac{p1(O_2)}{p2(O_2)} \quad mV$$

waarin $e_{p1} - e_{p2}$ de spanning over het schijfje is, en aan de beide zijden zuurstofdrukken p1 resp. p2 voorkomen (fig. 11).



Zirconia sensor characteristic

fig. 11

Wanneer we aan de ene zijde atmosferische lucht toelaten en aan de andere zijde uitlaatgas, en er voor zorgen dat de temperatuur omstreeks 600 - 800° C is, is de afgegeven spanning een maat voor de brandstof/lucht verhouding: In de buurt van het stoichiometrisch punt is de functie zeer steil en de indicatie nauwkeurig.
Door gebruik te maken van de evenredigheid van de door het schijfje getransporteerde hoeveelheden lading en zuurstof is het ook mogelijk bij armere mengsels een duidelijke uitkomst te krijgen.

CONCLUSIES

1) Om aan alle eisen van rendement, zuiverheid en rijgedrag te voldoen zijn wijzigingen in de motor van een auto nodig.
Het product van motorwijzigingen en precisie brandstofdosering is daarbij in 1e benadering constant.

2) Ook bij zeer gunstige motorwijzigingen blijven de eisen, aan brandstofdosering te stellen, hoog.

3) de eisen, te stellen aan constantheid tijdens levensduur zijn zeer zwaar.

4) de realisering van een motor die aan alle eisen voldoet is nog niet uitgekristalliseerd, en wel in die zin dat er verschillende mogelijkheden zijn, die verschillende eisen aan de daarbij gebruikte electronica stellen.

5) welke systeem de voorkeur heeft is slechts door langdurig onderzoek vast te stellen, terwijl de eisen voor uitlaatgassen snel gewijzigd (b.v. uitgesteld) kunnen worden.

Eindhoven, Juli 1975

Voordracht gehouden 22 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

PREISRECHNENDE WAAGEN MIT ELEKTRONIK IN MOS-TECHNIK

Ing. grad. H. Liedl
Siemens AG Bereich Bauelemente MOS-Entwicklung

The desire for an accurate display of weight, base price, and purchase price motivated a producer of scales to develop a price calculating scale. In close co-operation, Siemens, and Bizerba developed and produced a MOS-Electronic scale, which has become one of the most attractive products on the market. Besides the general advantages of MOS-Technology, which bring the manufacturer welcome cost savings, the MOS-System has especially proved itself through its dynamic operation and internal control logic, meeting also the requirements of the Bureau of Standards. In addition to a description of the MOS ICs, this article touches upon the manufacturing process, different weight conversion principles, future concept applications, and the development of MOS-technology in scale electronics. The article treats, as an example, the scale electronics of the firm Bizerba.

1. WERDEGANG DER ELEKTRONISCHEN PREISRECHNENDEN WAAGE

Die 1. Generation war der sogenannte Simiblockrechner, aufgebaut in Dickschicht und Relaistechnik. Bild 1 zeigt eine Skizze davon.

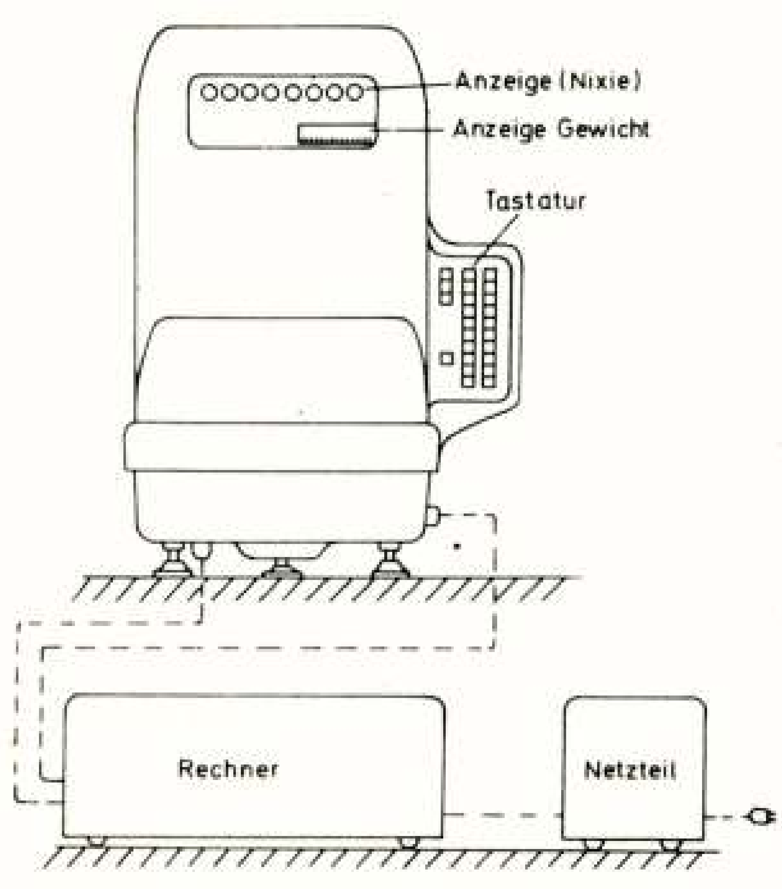


Bild 1. Erste Waagengeneration

Rechner und Netzteil befinden sich noch in einem eigenen Gehaeuse. Die Konstruktion der Waage selbst bleibt 3 Generationen unveraendert. Die Tastatur ist an der Seite der Waage angebracht. Die Anzeige ist im oberen Drittel der Waage zu sehen und zwar beidseitig, fuer Kaeufer und Verkaeufer. Das Gewicht wird fotoelektrisch mit einer Codierscheibe abgetastet und wurde erstmals bei dieser Waage mit Erfolg angewendet. Das Codierscheibe-Prinzip wird dann ebenfalls bis zur 4.Generation beibehalten.

Bild 2 zeigt das Prinzip der Gewichtsabnahme.

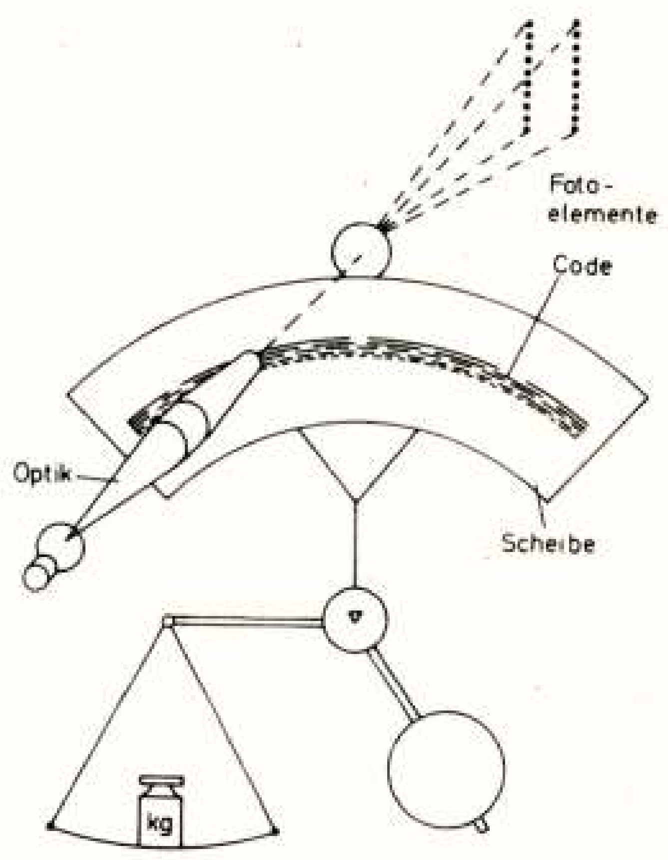


Bild 2. Prinzip mit Codierscheibe

An dem Wiegehebel der Neigungswaage ist eine Diapositivscheibe befestigt, auf der fotographisch Codespuren aufgebracht sind. Der Code wird mit einer Projektionsoptik auf Fotoelemente abgebildet. Als Code wird der einschrittige Gray-Code verwendet, der beim Uebergang von einem Wert zum anderen nur eine einzige Aenderung aufweist. Abweichungen vom Sollwert durch Zwischenstellungen koennen daher nur eine Gewichtseinheit betragen.

Die 2. Waagengeneration kam mit einem RTL-Rechner auf den Markt, der nur kurz erwaehnt sein soll, da dieser sehr bald vom MOS-Rechner abgeloest wurde. Der Rechner bestand aus ca. 200 RTL-Bausteinen und wurde in das Waagengehaeuse eingebaut.

Die 3. und 4. Generation sind die Waagentypen der Gegenwart, fuer die im Hause Siemens ein Rechner und ein Zaehlerbaustein in MOS-Technik entwickelt wurde. Zunaechst erschien die Waage bei der die Gewichtseingabe noch mit der Gray-Code-Scheibe erfolgte.

Bild 3 zeigt eine Uebersicht ueber die Gesamtelektronik.

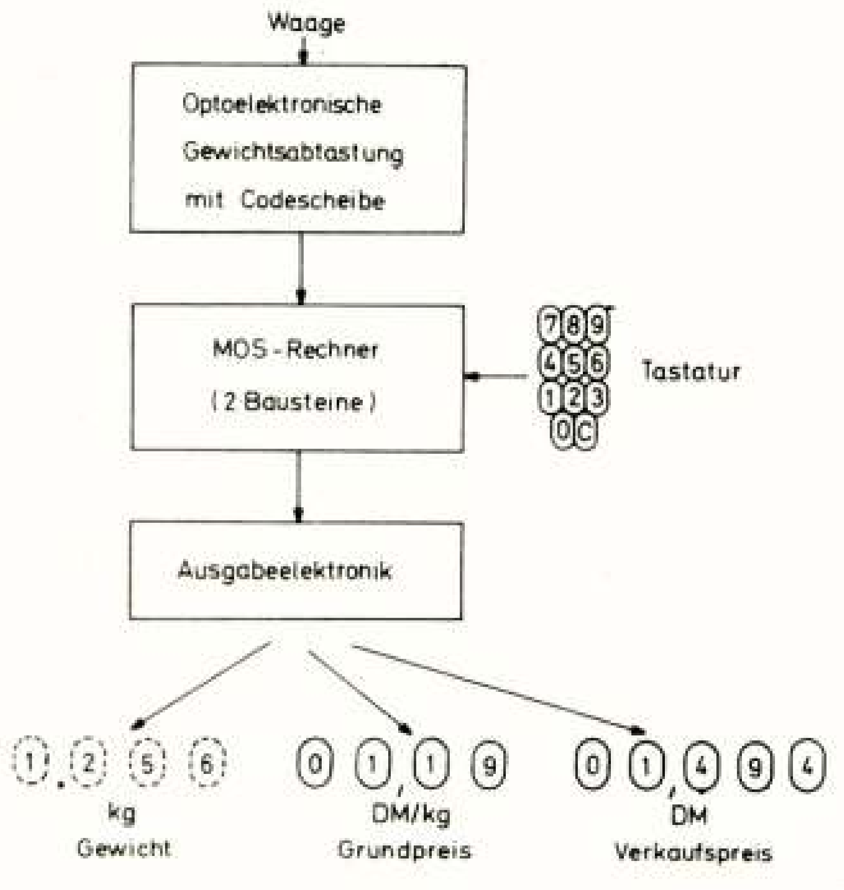


Bild 3. Uebersicht von der Gesamtelektronik der Gray-Code-Waage

Das Gewicht wird wie vorher erklaert, optisch eingelesen. Der Grundpreis wird mit einer Zehnertastatur eingegeben. Angezeigt werden Grundpreis und Verkaufspreis. Das Gewicht wird mechanisch angezeigt, es koennte jedoch auch elektronisch erfolgen. Der Rechner selbst besteht nur noch aus zwei 24-poligen Bausteinen.

Die neueste Entwicklung ist die Waage mit inkrementaler Gewichtseingabe. Die Skizze von Bild 4 zeigt als wesentliches aeusseres Merkmal eine neue Konstruktion.

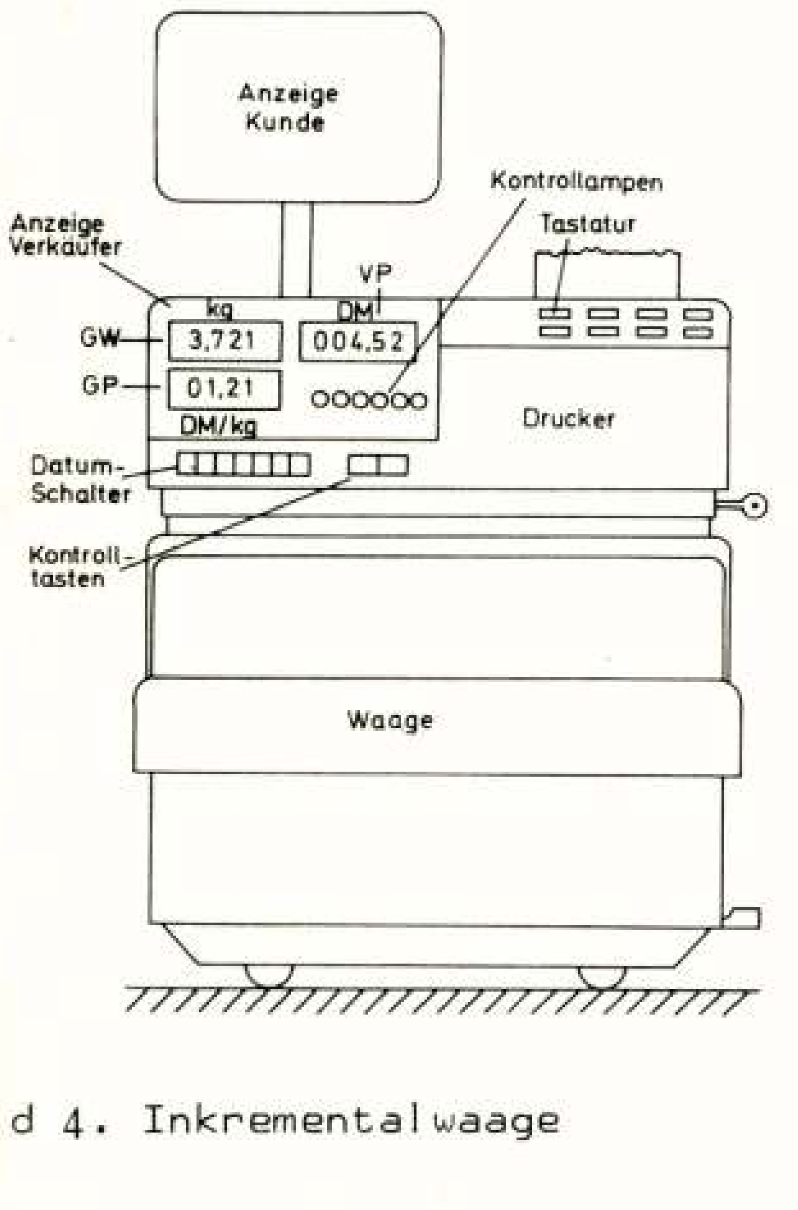


Bild 4. Inkrementalwaage

Zusaetzlich in das Waagengehaeuse eingebaut ist ein Druckwerk, angezeigt wird neben Verkaufs- u. Grundpreis auch das Gewicht.

Auf Bild 5 ist die Uebersichtselektronik dargestellt.

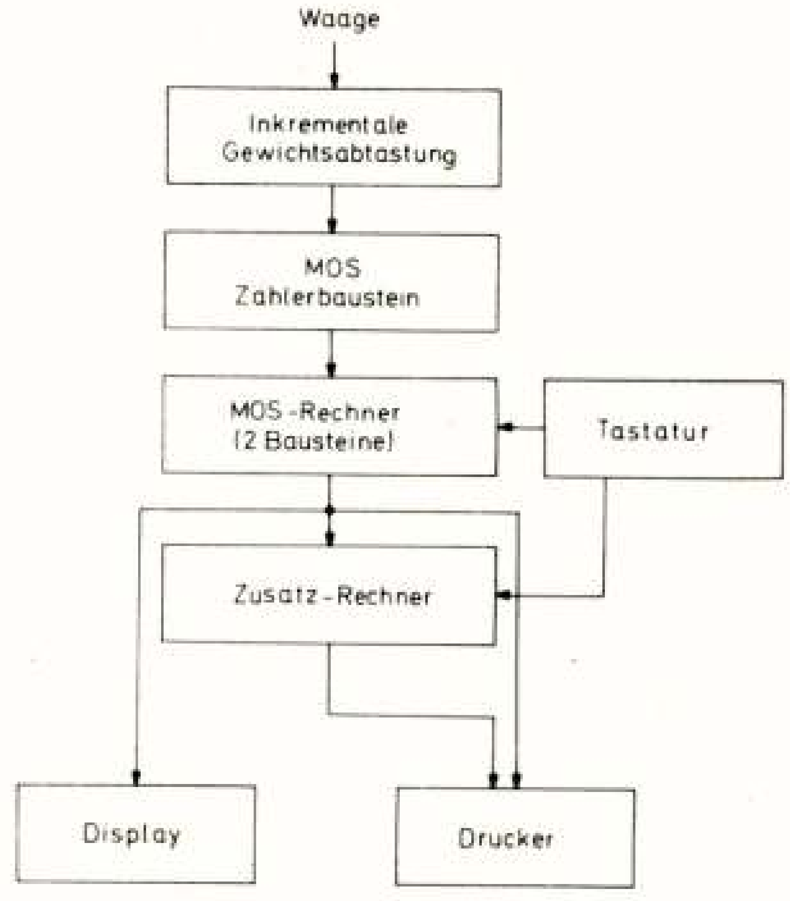


Bild 5. Uebersicht der Gesamtelektronik der Inkrementalwaage

Das Gewicht wird fotoelektrisch abgetastet und zwar werden dem Gewicht entsprechende Impulsmengen erzeugt, die im speziell dafuer entwickelten Zaehlerbaustein gespeichert werden. Von hier aus gelangt das Gewicht wieder in den Rechner.

Durch die Erweiterung mit einer zusaetzlichen arithmetischen Einheit, kommen weitere Zusatzfunktionen wie Druckwerkansteuerung, Tagessummenbildung und Minuskorrekturen hinzu.

Ein Vergleich dieser 4 Waagengenerationen soll insbesonders den Vorteil der neuen MOS-Waagentypen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und der geforderten Strenge durch die Eichbehoerden hervorheben.

1. Die ersten beiden Generationen fuehrten zur Ermittlung des Verkaufspreises nur eine Rechnung durch. Der MOS-Rechner rechnet aufgrund seiner optimalen Arbeitsweise staendig den Verkaufspreis aus. Momentane Stoereinfluesse sind hinsichtlich Betriebssicherheit beim MOS-Rechner deshalb wirkungslos.

2. Durch Einschraenkung der Anschlussanzahl durch Grossintegration wird neben der Reduzierung des externen Verdrahtungsaufwandes ein hohes Mass an Zuverlaessigkeit und mechanischer Stoersicherheit erreicht.

3. Durch niedrige Gesamtverlustleistung des MOS-Systems, ca. 1 W, geringer Aufwand fuer das Netzteil und Waermeabfuehrung

4. Durch Einfuehrung der inkrementalen Gewichtserfassung besitzt der Waagenhersteller eine wirtschaftliche Eingabemoeglichkeit.

2. FUNKTIONSBESCHREIBUNG DES MOS-RECHNERS

Bild 6 zeigt das Blockschaltbild, dessen Funktionsbloecke sich in Taktsystem, Eingabe, Speicher, Addierwerk und Ausgabe gliedern.

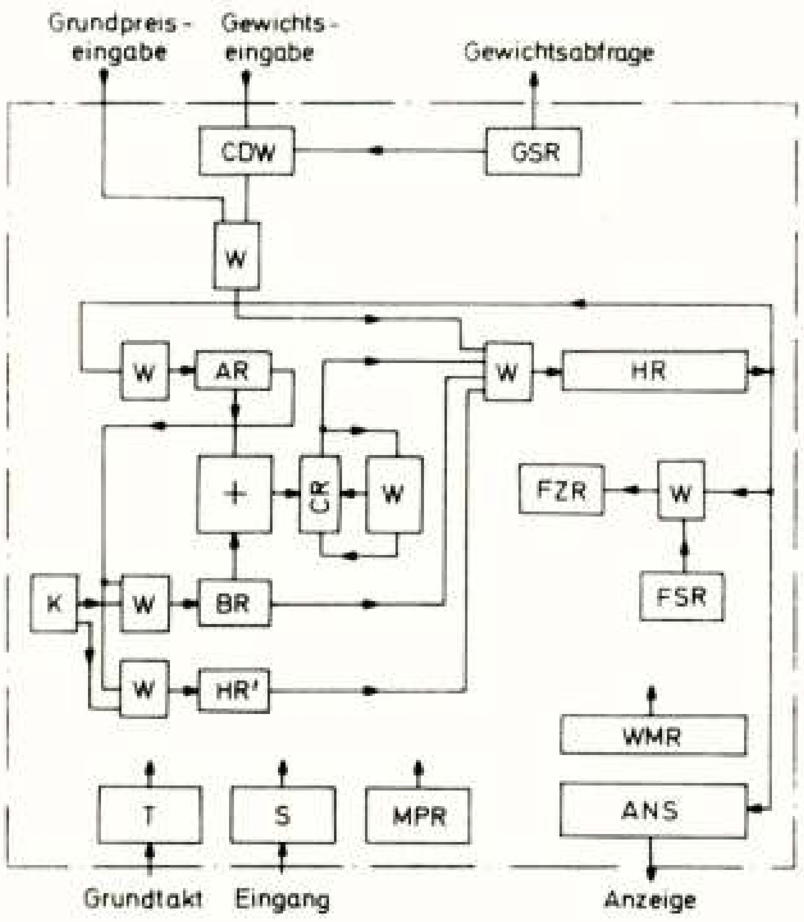


Bild 6. Blockschaltbild des MOS-Rechners

Speicher oder Informationsregister

Es ist ein dynamisches Schieberegister, bestehend aus den Registern AR, BR, HR', CR und HR. Je nach Rechenoperation sind die Teilregister ueber Weichenlogiken W mit dem HauptregisterHR zu einem Ringlauf gekoppelt. Ueber die Weichen koennen also in dem staendig umlaufenden Register alle fuer den Rechnungsverlauf vorkommenden Werte eingespeichert oder herausgenommen werden. Die Information ist organisiert in 30 Worte zu je 5 Bit. Ein Wort besteht aus einer BCD-Tetrade und dem Parity-Bit.

Eingabe

Mit Funktionsblock S wird grundsaetzlich ein Tastendruck erkannt. Ueber eine Weiche gelangt je nach Programmschritt der Grundpreis oder das Gewicht in den Informationsring. Wegen der Ueberpruefung der fotoelektrischen Abtastung sind zwei versetzte Ablesezeilen vorhanden.Es werden daher 4 Normalgewichte und 4 ueberhoehte Kontrollgewichtsstellen eingegeben, die dann waehrend des Rechenablaufes verglichen werden. Die zeitliche Reihenfolge der Gewichtseingabe steuert das Gewichtsstellenregister GSR.

Rechenwerk

Die Multiplikation von Grundpreis und Gewicht sowie der Vergleich der Gewichtswerte wird ueber das Rechenwerk abgewickelt, das aus einem 4 Bit Volladdierer besteht. Er bildet die Summe aus den Worten die im AR und BR Register stehen. Sie wird im CR Register abgespeichert und gelangt von hier aus wieder in das Hauptregister. Die Multiplikation von Gewichtswert und Grundpreis erfolgt durch wiederholtes Addieren des Gewichtswertes mit sich selbst, wobei die Anzahl der Wiederholungen durch den Grundpreis bestimmt wird. Das Faktorziffernregister FZR nimmt jeweils eine Grundpreisstelle auf und bestimmt durch Abzaehlung auf 0 die Zahl der Additionsumlaeufe. Das Faktorstellenregister FSR bestimmt, welche Stelle des Grundpreises abzuarbeiten ist.

Taktsystem

Bild 7 bringt die Anordnung des Taktrasters.

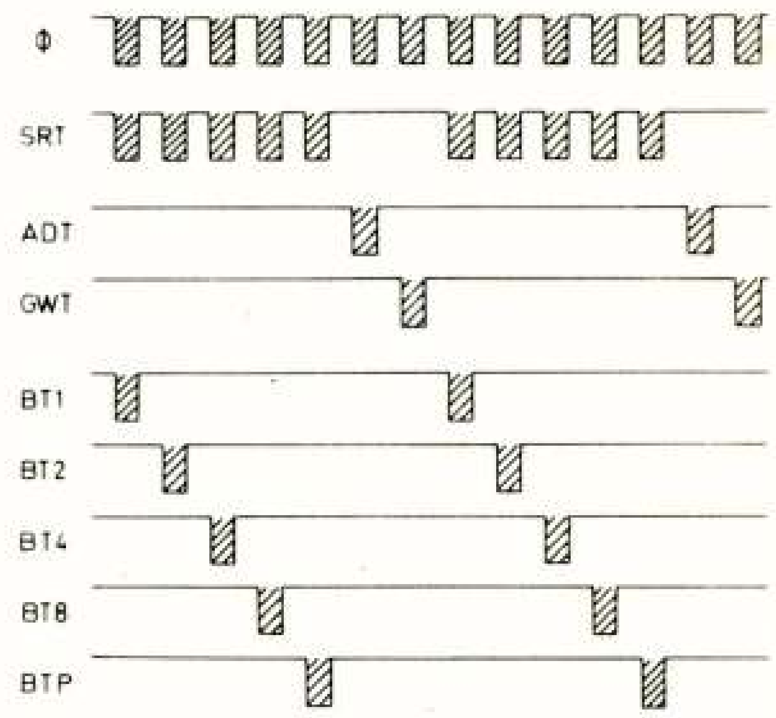


Bild 7. Taktsystem

An den Schaltkreisen muss ein externer Grundtakt Ø eingespeist werden. Intern werden die Schiebetakte SRT erzeugt. Sie bestehen aus Gruppen zu je 5 Takten fuer die Verschiebung eines Wortes. Dazwischen liegen die Steuertakte ADT und GWT, womit z.B. der Additionstakt oder Gewichtseingabetakt abgeleitet wird. Mit BT1,BT2, BT4, BT8 und BTP ist es moeglich, jedes Bit eines Wortes anzusprechen. Dies wird benoetigt,bei Konstanteneingaben, die dem Konstantenspeicher K entnommen werden.

Dies vereinfacht dargestellte Taktsystem ist in der MOS-Schaltung spezifisch auf die dyn. 2 Phasentechnik zugeschnitten.

Ausgabe

Der Block ANS ist fuer die Ausgabe bzw. Anzeige zustaendig, die zeitmultiplex erfolgt. D.h. zu einem Zeitpunkt wird immer nur eine Stelle, also BCD-Tetrade ausgegeben, wobei Stellenausgaenge dafuer sorgen, welche Stelle jeweils ausgegeben wird. Die Ausgabe aller Stellen erfolgt seriell und wiederholt sich zyklisch.

Steuerwerk

Es bestimmt den Ablauf eines Rechenzyklusses u. stellt immer zum richtigen Zeitpunkt die Weichen,

so dass eine Eingabe, Ausgabe, Multiplikation, Gewichtsvergleich usw. zustande kommt. Die massgeblichen Bloecke sind die Mikroprogrammsteuerung MPR, das Wortmarkierungsregister WMR und das Taktsystem T. Das Wortmarkierungsregister hat die Aufgabe, die Worte des Informationsregisters zu addressieren. Die Mikroprogrammsteuerung liefert die Hauptschritte eines Rechenablaufes.

Eigenueberpruefung des Rechners

Wesentlicher Bestandteil des Rechners sind die Schaltungsteile und Ueberwachungsstellen, die ein 100% sicheres Arbeiten im Sinne der Eichbehoerden gewaehrleisten. Folgende Massnahmen wurden getroffen:

1. Verwendung eines einschrittigen Codes fuer die Gewichtsabfrage.
2. Doppelter Gewichtswertabgriff an der Codescheibe.
3. Vergleichen der Gewichtswerte in speziellen Mikroprogrammschritten.
4. Ergaenzung des verwendeten BCD-Wortes durch ein Paritybit. Hierdurch wird festgestellt, wenn auf dem Uebertragungsweg ein Bit verfaelscht wird.
5. Ueberpruefung der Addition.
6. Ueberpruefung des Faktorziffernregisters.
7. Zusaetzliche Pruefung der Ueberwachungsstellen durch 2 Kontrolltasten, mit denen Gewichts- und Grundpreiseingabe verfaelscht eingegeben werden.

Die verschiedenen Ueberwachungsstellen sind zusammengefasst zu 2 Alarmausgaengen, wobei einer fuer das Gewicht und einer fuer die Paritaetspruefung zustaendig ist. Tritt Alarm auf, so wird die Anzeige dunkel.

3. FUNKTIONSBESCHREIBUNG DES ZAEHLERBAUSTEINES FUER INKREMENTALE GEWICHTSABNAHME

Bild 8 zeigt das Abnahmeprinzip.

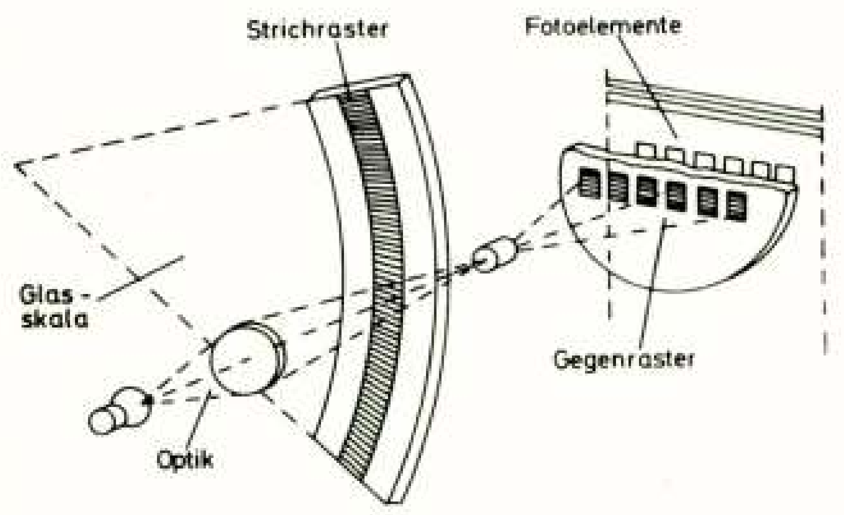


Bild 8. Gewichtsabnahmeprinzip der Inkrementalwaage

In der Waage befindet sich eine mit dem Wiegemechanismus verbundene Glasskala, auf die ein schwarz weisses Strichraster aufgebracht ist. Die Anzahl der Striche entspricht der Anzahl der Gewichtsstufen, fuer den Waegebereich. Das Raster wird mit Hilfe einer Projektionsoptik auf eine Gegenrasterplatte projiziert, innerhalb deren Flaeche sich das Gegenraster befindet. Hinter den Fenstern sind Fotoelemente angebracht, die je nach Deckungszustand von Raster und Gegenraster Licht oder Dunkelheit bekommen.

Die elektrischen Impulse, welche die Fotoelemente beim Bewegen der Waage infolge Lichtwechsel erzeugen, werden im Vor- Rueckwaertszaehler gezaehlt, so dass stets der Zaehlerstand dem jeweiligen Belastungszustand der Waage entspricht. Voraussetzung hierfuer ist, dass der Zaehler bei Null beginnt, wenn die Waage auf Null steht. Hierfuer ist auf der Skala ein Nullmarkenraster angebracht.

Zur Unterscheidnng der Vor- Rueckwaertsbewegung, zur Aufnahme des Nulldurchganges und zur Sicherung gegen moegliche defekte elektrische Bauteile entsprechend den Vorschriften der Eichbehoerde, sind 6 Abnahmekanaele vorhanden, mit denen 2 komplette Vor- Rueckwaertszaehler betrieben werden.

Bild 9 zeigt das gesamte Blockschaltbild des Zaehlerbausteines.

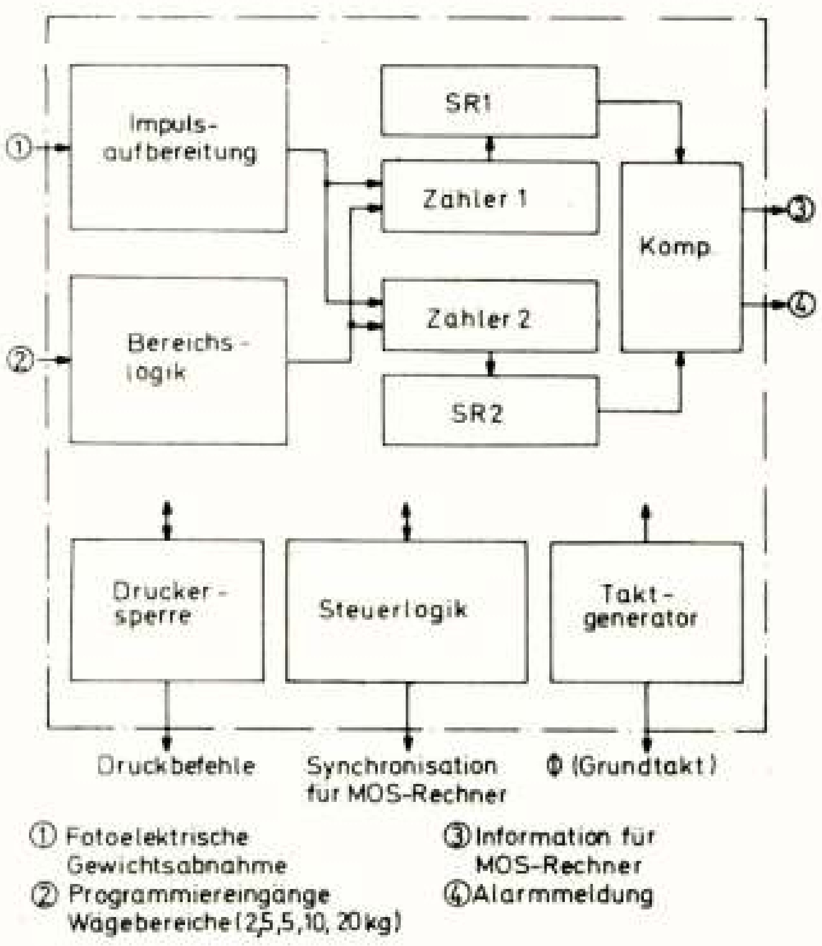


Bild 9. Blockschaltbild des MOS-Zaehlerbausteines.

Von der Gewichtswertabnahme gelangen die Zaehlsignale ueber die Impulsaufbereitung in die beiden Zaehler. Von hier aus wird die Information in je ein Schieberegister parallel ueberspielt. Die Ausgaenge der Schieberegister fuehren zu einem Komparator, in dem seriell Bit fuer Bit verglichen wird. Bei Ungleichheit zwischen SR1 und SR2 entsteht ein Alarmsignal, das die Anzeige dunkel steuert. Die Information eines SR ge-

langt gleichzeitig in den MOS-Rechner.

Mit Programmeingaengen koennen verschiedene Waegebereiche eingestellt werden, die mit Hilfe der Bereichslogik auf die Zaehler einwirkt. Taktgenerator und Steuerlogik erzeugen die Schiebetakte und die Synchronisation mit dem MOS-Rechner, damit zum richtigen Zeitpunkt die richtige Gewichtsstelle im Informationsregister des Rechners steht. Ausserdem erzeugt die Steuerlogik Signale fuer die Waagenbereiche. Die Druckersperre gibt nur eine Druckfreigabe, wenn die Waagenschale sich in Ruhelage befindet.

4. ENTWICKLUNGSABLAUF DER MOS-BAUSTEINE

Die vielen Arbeitsschritte lassen sich in 5 Entstehungsphasen einteilen.

1. Systemphase

Hier wird mit einem zugrunde gelegten Pflichtenheft und erstem Schaltungsentwurf, welche beide von der Firma Bizerba vorgelegt wurden, die MOS gerechte Logik ausgearbeitet. Zwischenschritt, ist die Logik-Simulation, die in TTL-Brettschaltung erstellt wurde.

2. Das Design

Hier wird die elektrische Schaltung in eine geometrische Schaltung umgesetzt. Teilschritte sind Strukturenberechnungen, Zeichnen des Layouts, Datenaufnahme des Layouts auf Magnetband, Erstellung einer Kontrollzeichnung. Das Band steuert Maschinen fuer die Maskenherstellung.

3. Die Maskenherstellung

Masken werden benoetigt fuer den fotographischen Prozess bei der Siliziumscheibenherstellung. Die hierbei verwendeten Arbeitsmasken im Massstab 1:1 gewinnt man dabei ueber die Reduzierschritte Maskenvorlage 100:1, Reticle 10:1, Muttermaske 1:1, davon als Kopie, die Arbeitsmaske.

4. Der technologische Prozess

Auf einer Si-Scheibe wird mit Hilfe der Fototechnik durch Diffusions-, Reinigungs- und Bedampfungsschritte die Geometrie der Schaltung aufgebracht. Die Waagenschaltkreise sind in Standard-P-Kanal-Technologie erstellt.

5. Pruefung und Montage

Hier ist die Reihenfolge: Scheibenmessung, Zerteilung der Scheibe in Chips. Einbau in das Gehaeuse, Endtest.

5. ZUKUENFTIGE GESTALTUNG DER MOS-WAAGEN-ELEKTRONIK

Das Ziel der weiteren Entwicklung ist, auf breiter Basis die Bausteine einzusetzen, deren Aufgabe es ist, einen Verkaufspreis oder dergleichen unter Eichgenauigkeit zu ermitteln. Als zusaetzlicher Markt zu den elektronischen Waagenrechnern gesellen sich hier, z.B. auch die Tanksaeulenrechner, bei denen ebenfalls ein Verkaufspreis aus Litermenge und Literpreis gebildet wird.

Es ist jedoch schwierig, allen Waagen und% Tanksaeulenherstellern mit ihren spezifischen Ein- und Ausgabeanforderungen mit einem Bausteinsystem gerecht zu werden.

Zur Zeit befindet man sich noch in der Konzeptfindungsphase, wobei Konzepte diskutiert werden, die nur noch aus einer Ein-Chiploesung bestehen.

Vortrag wurde gehalten am 22.05.1975 in der TH Twente in Enschede, als Beitrag zum Symposium der NERG und IEEE (Benelux Sektion) "Ontwerpen en realiseren in de elektronica"

Literatur:

Katholing, Guenther: Vollelektronische Waagen in MOS-Technik, Funkschau 4 (1973)
Katholing, Guenther: MOS-Technologien, Design, Anwendungen Siemens AG, Bereich Bauelemente Vertrieb.

Voordracht gehouden 22 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

GEINTEGREERDE CIRCUITS IN ELECTRONISCHE MUZIEKINSTRUMENTEN

Ir. T. van der Kooij
B.V. Eminent, Bodegraven

The range of integrated circuits used in electronic musical instruments extends from small bipolar circuits to large MOS circuitry, with chip area's up to 22 mm^2. As an example of such a l.s.i. application, a system for automatic bass accompaniment is described. On the base of a typical organisation of an electronic musical instrument, the present scale of integration and the problems to reach a larger scale, are indicated. Some newer developments to solve these problems are described, they are mainly based on multiplex with time-division and reading out digitally stored waveforms.

INLEIDING

Het gebruik van geïntegreerde circuits in electronische muziekinstrumenten strekt zich uit van eenvoudige bipolaire circuits, zoals standaard t.t.l., frequentie delers, tot gecompliceerde MOS circuits met chip-oppervlakten tot ca. 22 mm^2. Dergelijke grote circuits maken in het algemeen geen deel uit van het muziekinstrument zelf, maar van accessoires, zoals micro-programmers voor automatische begeleidings systemen. Als voorbeeld van een toepassing van l.s.i. zal een systeem voor automatische bas begeleiding beschreven worden.

Een middelgroot electronisch muziekinstrument bevat altijd nog ca. 2000 electronische componenten. Het is de ontwerper er dan ook alles aan gelegen een hoge integratie graad te bereiken, de problemen daarbij en de eventuele toekomstige oplossingen daarvan zullen worden besproken.

AUTOMATISCHE BASBEGELEIDING

Voor Eminent is ontwikkeld een circuit voor automatische basbegeleiding, dat bij elk willekeurig aangeslagen accoord automatisch en in de juiste toonsoort een aantal ritmische basbegeleidings figuren produceert, van een eenvoudige grondtoon-quint wisselbas tot gecompliceerdere toonreeksen van maximaal 8 tonen.

Het circuit (fig.1) bestaat hoofdzakelijk uit dood-geheugen matrices. Aanwezig is een programma geheugen waarin maximaal 8 bas programma's kunnen worden opgeslagen, geadresseerd door een programma teller en een externe programma kiezer.

Aan de ingang van het systeem bevinden zich 12 toets-contacten, die gesloten worden bij het indrukken van toetsen. Op deze wijze kunnen er 2^{12} ingangswoorden (accoorden) ontstaan, die door twee herleidings trappen herleid worden naar 12 majeur, 12 mineur toonsoorten en 7 "amorfe" accoorden, (d.w.z. accoorden waaraan geen bepaalde toonsoort aan toegekend kan worden), totaal 31 mogelijkheden.

Deze herleiding gaat ter besparing van geheugenbits in twee trappen, gebruik makend van het feit, dat twee naast elkaar aangeslagen toetsen (bijv. C-Cis) herleid mogen worden naar één, bijv. de laagste.

Aan de uitgang van de herleidingstrap 2 verschijnt de toonsoort van het accoord in 5 bits binair gecodeerde vorm.

Om alle basprogramma's in alle toonsoorten te produceren zijn in totaal 24 tonen nodig. Beide geheugens adresseren daartoe een 3e geheugen, waarin de bastoonselectie plaats vindt: aan de uitgang verschijnen in ritmische volgorde binaire woorden, die elk een bastoon representeren, passend bij de toonaard van het accoord (bepaald door de ingangen A'_0 - A'_4) en het gekozen basprogramma (bepaald door de ingangen A'_5, A'_6 en A'_7).
Een 5 naar 24 decoder tenslotte bestuurt een aantal toonpoorten, die de betreffende audio frequentie's doorschakelen naar de uitgang. De snelheid waarmee het basprogramma wordt uitgevoerd, wordt geregeld met de klokfrequentie die de teller stuurt. Het totaal aantal geheugenbits bedraagt ca. 5000.
Het circuit is zoveel mogelijk opgebouwd uit standaard configuratie's (dood-geheugens en decoders), "random logic" is zoveel mogelijk vermeden. De toch wel ingewikkelde muzikale functie van het systeem wordt ook volledig vastgelegd door de waarheidstabellen van de diverse geheugens, zodat de conversatie met de ontwerper van het geïntegreerde circuit technisch blijft, begrip van de muzikale achtergronden is voor hem niet noodzakelijk.

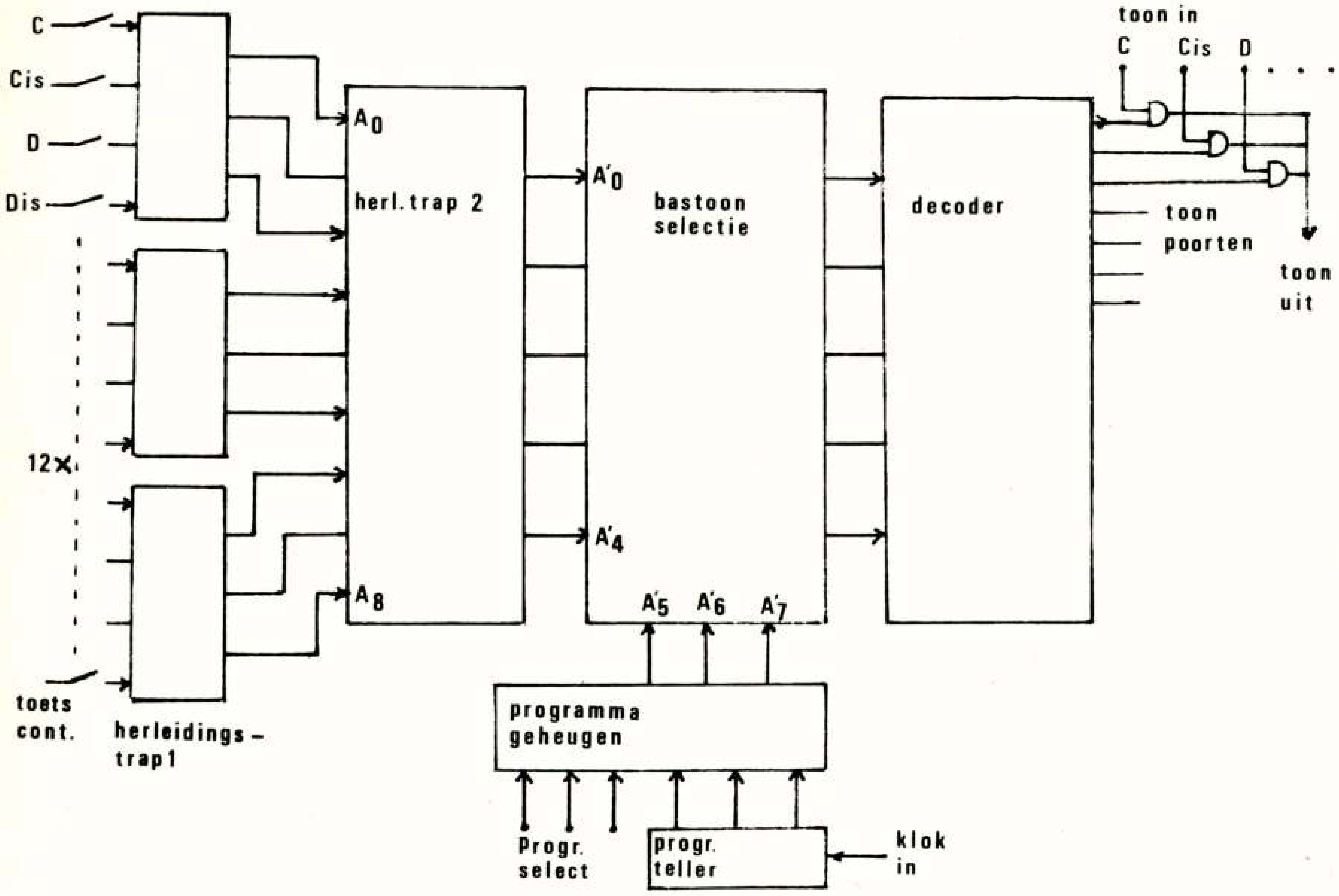


Fig. 1 - Systeem voor automatische basbegeleiding.

INTEGRATIE IN HET MUZIEKINSTRUMENT

Is de integratiegraad in boven genoemde toepassingen vrij groot, anders is dit gesteld in het muziekinstrument zelf. Hierin vindt men in het algemeen grote aantallen kleine circuits, en dan nog bijna uitsluitend in het toon-genererend en het toonschakelend gedeelte, de verdere signaalverwerking, zoals klankvorming door filteren, menging en overige analoge bewerkingen worden nog bijna geheel met discrete componenten uitgevoerd.

Om tot een hogere integratiegraad te komen, moet voldaan zijn aan twee voorwaarden, die tegelijk ook de twee hoofdproblemen voor de muziekinstrument ontwerper vormen:

a. een consequent doorgevoerde digitalisering van het ontwerp.

b. reducering van het grote aantal verbindingen dat met geïntegreerde circuits gemaakt moet worden.

In het volgende zal, uitgaande van een overzicht van de bestaande situatie enkele wegen worden aangeduid die in de toekomst misschien tot een grotere integratiegraad kunnen leiden.

Toongeneratie.

Een electronisch orgel bevat een aantal toonbronnen, minstens evenveel (vaak meer) als manuaal toetsen. Deze toonbronnen zijn gestemd volgens de "getemperde toonschaal", hierbij is het octaaf-interval verdeeld in 12 gelijke intervalverhoudingen, d.w.z. de frequentieverhouding van twee opeenvolgende tonen is constant en gelijk aan de 12e machtswortel uit 2.

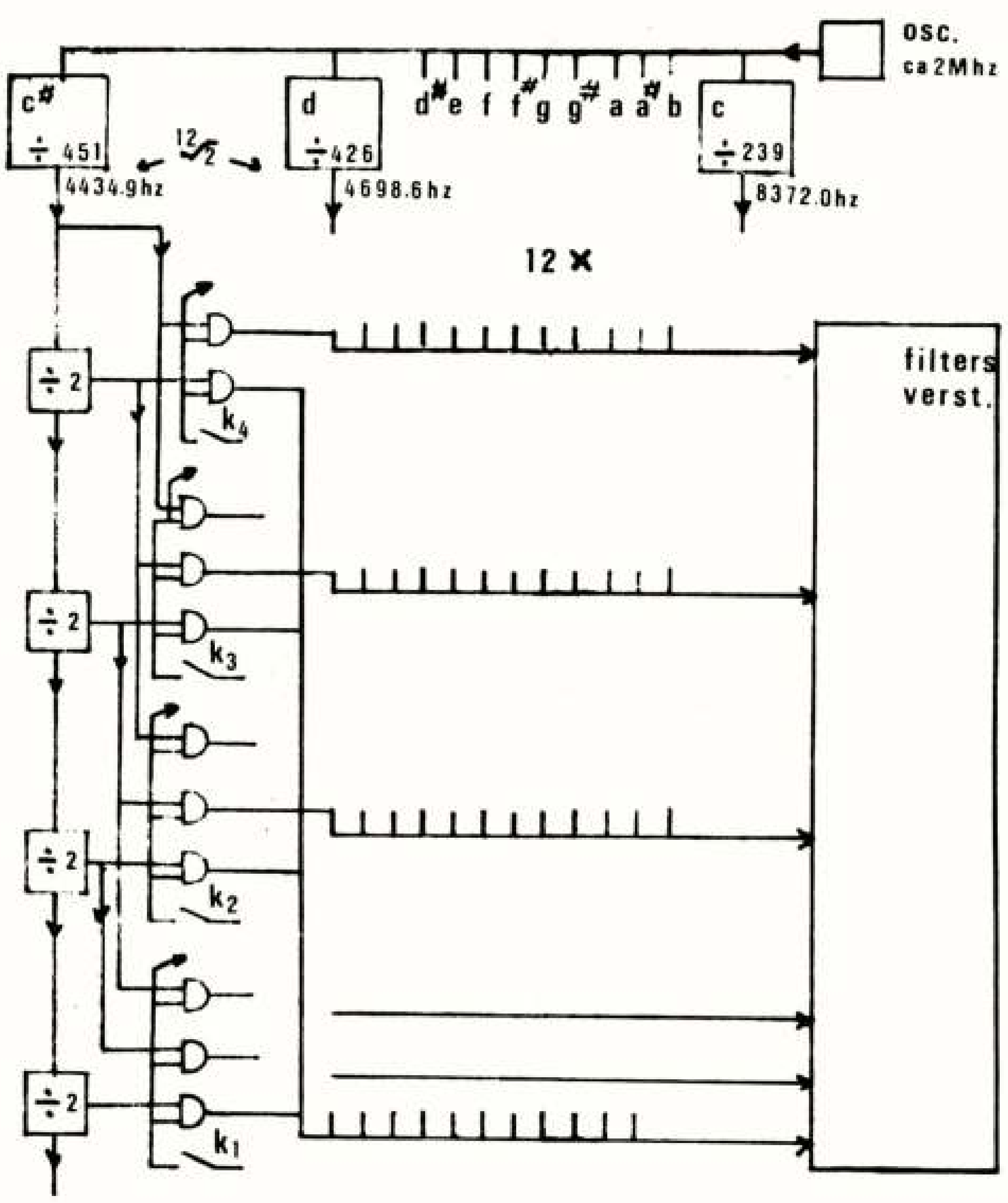


Fig. 2 - Gebruikelijk electronisch muziekinstrument

Een gebruikelijk instrument (fig.2) begint met de vorming van de tonen in het hoogste octaaf d.m.v. een zgn. "topoctave synthesizer", waarvan verschillende typen in de vorm van een geïntegreerd circuit in de handel zijn. In het voorbeeld van fig. 2 wordt een frequentie van ca. 2 Mhz gedeeld door een aantal gehele getallen, die zo gekozen zijn dat zij de muziektoonfrequentie's zo goed mogelijk benaderen. De maximale relatieve afwijking van dit systeem bedraagt ± 1 cent of ca. 0,7 ^{0}/oo hetgeen geaccepteerd kan worden. Nauwkeurigere systemen maken gebruik van deling door een niet-geheel getal, of van het feit dat de 12e wortel uit 2 goed benaderd wordt door de breuk 196/185. De nauwkeurigheid van deze systemen is in het algemeen een factor 10 groter (1) (2) (3) (4).

De overige muziektonen zijn sub-octaven van de hoogste tonen en kunnen met eenvoudige frequentie twee-delers hiervan afgeleid worden, aan elke uitgang van de topoctave synthesizer is een keten van twee-delers aangesloten. Een aantal delers, geïntegreerd in één circuit vormt het oudste geïntegreerde circuit dat voor electronische muziekinstrumenten is ontwikkeld (4).

Toonschakeling.

Aan elke manuaaltoets is een contact toegevoegd, dat gesloten wordt wanneer de betreffende toets is ingedrukt. Elk contact K opent een aantal poorten, in het voorbeeld drie, die t.o.v. elkaar octaafgerelateerde tonen doorschakelen. Men kan dit opvatten als het apart doorschakelen van een grondtoon en twee octaaf harmonischen, gezamenlijk "koren" genoemd, een maximum van 5 octaafkoren is gebruikelijk. Ook quint en tertskoren komen voor, dit betekent bijv. dat Cis toets K1 ook poorten schakelt bij de F deler keten (terts van Cis) en bij de Gis (quint van Cis).

De uitgangen van de poorten kunnen op verschillende wijzen verzameld worden: per koor op zgn. koor-railen, om praktische reden vaak ook per octaaf op octaaf-railen, waarbij de samenvoeging tot koren later gebeurd.

Bij instrumenten met meerdere manualen is aan elk manuaal een dergelijk poortsysteem toegevoegd. Zo bevat een middelgroot orgel met twee klavieren van 49 toetsen, 5 koren op het ene en 3 koren op het andere manuaal 392 poorten. Een groot orgel met twee manualen van 61 toetsen, 9 koren op het ene, 5 koren op het andere manuaal 854 poorten.

Het aansluitingsprobleem.

Zou men een dergelijk systeem op één chip integreren, dan zouden voor het middelgrote orgel 98 toets- en minstens 8 uitgangsaansluitingen gemaakt moeten worden, voor het grote orgel resp. 122 en 14.
Er bestaat een circuit, waarbij 3 delerketens met bijbehorende toets-poorten op één chip is geïntegreerd, men heeft dan 4 identieke I.C.'s, elk met 40 aansluitingen, hetgeen vrij kostbaar moet zijn (5).

Parallel - serie - parallel omzetting.

Een methode om het aantal verbindingen aan de toetscontact kant te reduceren is parallel - serie omzetting, bijv. door multiplex met tijd verdeling. Fig. 3 geeft hiervan een voorbeeld: de toetscontacten K_1-K_2 zijn verbonden aan de uitgangen van een ringteller of schuifregister, waarvan het spannings niveau van de uitgangen, op één na, nul is. Bij elke klokpuls schuift het spannings niveau van deze ene uitgang één plaats op, zodat alle toetscontacten gedurende een cyclus achtereenvolgens bekrachtigd worden (zie ook fig.4). Bij een aantal ingedrukte toetsen verschijnt op de contact verzamelrail het multiplex signaal in de vorm van een puls trein, waarbij een bepaalde toets correspondeert met een puls op een bepaalde "tijd plaats".

Het aantal verbindingen met het circuit is daarmee gereduceerd tot twee, één voor het multiplex signaal en één voor het klok signaal.

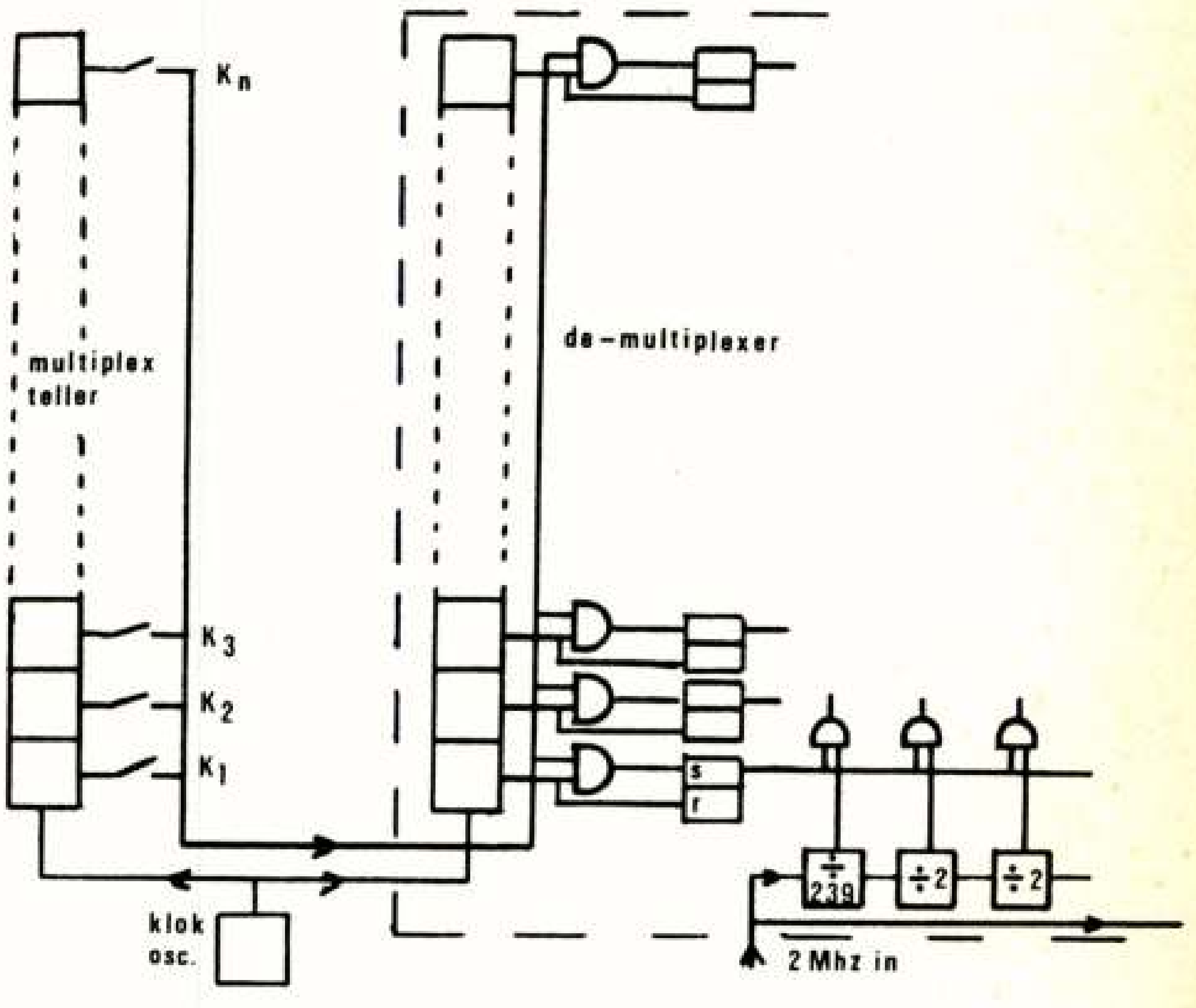


Fig. 3 - Parallel - serie - parallel omzetting.

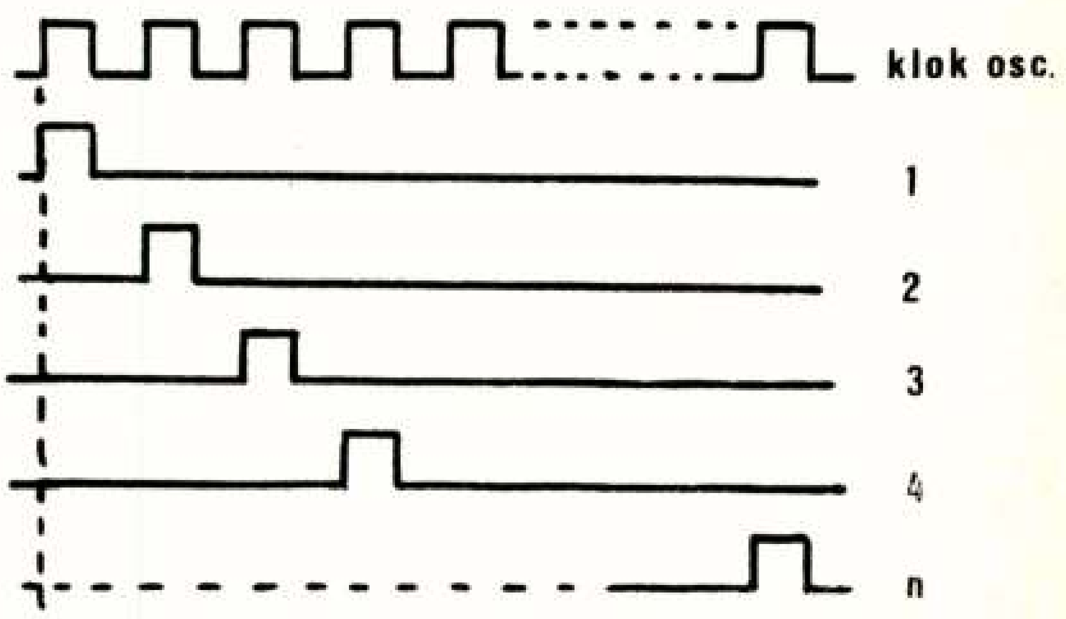


Fig. 4 - Uitgangsniveau's multiplex teller.

De - multiplex vindt plaats met behulp van een tweede teller of schuifregister, dat synchroon loopt met de eerste.
Voor een bepaalde ingedrukte toets coïncideert een puls in het multiplex signaal met een spanning voerende uitgang van de teller. Beide signalen brengen via een EN-poort een flip-flop in set positie, welke een aantal toonpoorten openschakelt, en daarmee de rol van de toetscontacten in fig. 2 overneemt. Bij het loslaten van een toets wordt de flip-flop bij de volgende multiplex cyclus door de teller in re-set toestand gebracht (set moet reset overheersen).

Hoewel de verdere ontwikkelingen in deze richting veelbelovend lijken, blijft als nadeel de verdere analoge signaal verwerking. Ook het beïnvloeden van de omhullende bij indrukken en loslaten van de toets ("attack, decay, sustain") is moeilijk te verwezenlijken.

DIGITALE KLANKVORMING MET EEN BEPERKT AANTAL GENERATOREN

Uitgaande van het feit dat een normale orgelspeler niet meer dan tien vingers en twee voeten ter beschikking heeft, is het niet nodig voor iedere toets een generator ter beschikking te hebben, een maximum van twaalf kan voldoen. Figuur 5 geeft een organisatie schema van een dergelijk instrument.
De informatie over aangeslagen toetsen is altijd in multiplex-vorm aanwezig op eerder beschreven wijze. Tussen de manuaal multiplexer en de generatoren bevinden zich twee circuits: een toewijzings circuit, dat een bepaalde generator toewijst aan een aangeslagen toets, en deze gereserveerd houdt voor deze toets, en een tweede circuit, dat de toonhoogte behorende bij de toets bepaalt.

Het toewijzings circuit.

Hiervoor bestaan verschillende oplossingen. Bij een bekende uitvoering (6) bevat elke generator een flip-flop die de status (geclaimd of niet) bepaalt. Een scanner tast alle flip-flop's af en stopt bij een niet geclaimde generator. Bij de eerstvolgende toets puls in het multiplex signaal klapt de flipflop om en reserveert de generator zolang de toets is ingedrukt. Voorzieningen zijn aanwezig om te verhinderen dat één toets meerdere generatoren of reeds geclaimde generatoren reserveert. Ook moet na het loslaten van een toets de generator worden vrijgegeven.

De golfvorm generator.

Aangezien er maar een beperkt aantal generatoren aanwezig zijn, kan men deze wat duurder uitvoeren dan in een"traditioneel" instrument. Een bepaalde golfvorm, ontleend bijv.aan een registratie van een

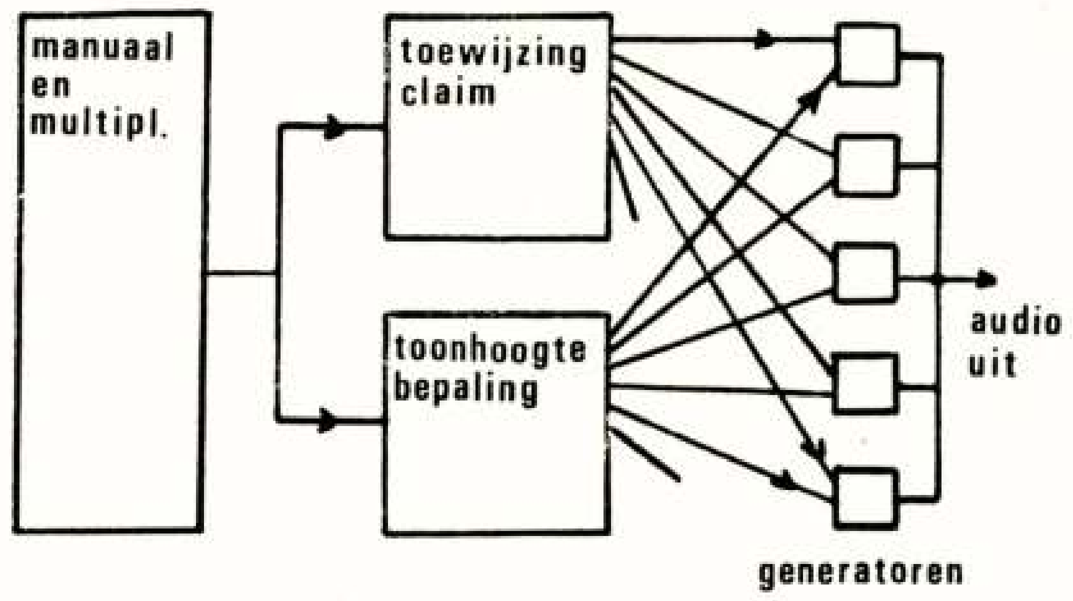


Fig. 5 - Instrument met beperkt aantal toongeneratoren.

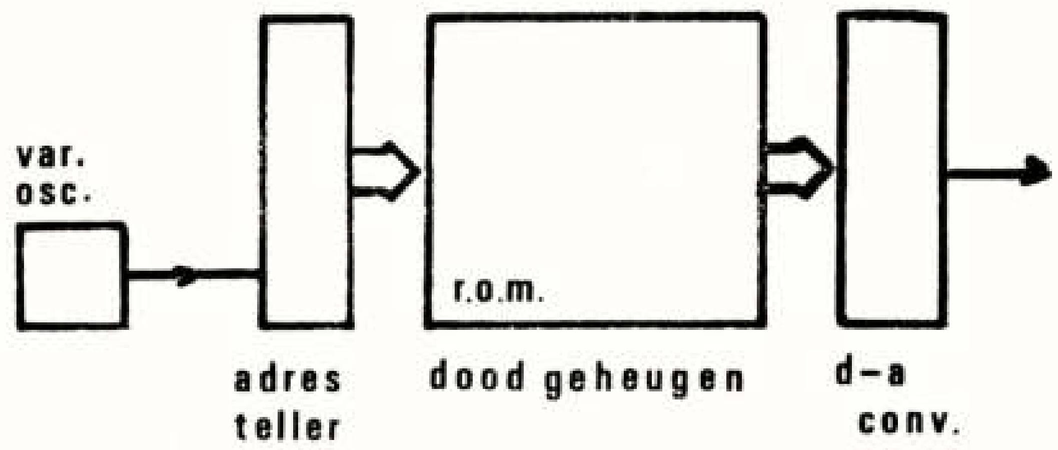


Fig. 6 - Uitlezen van een digitaal opgeslagen golfvorm.

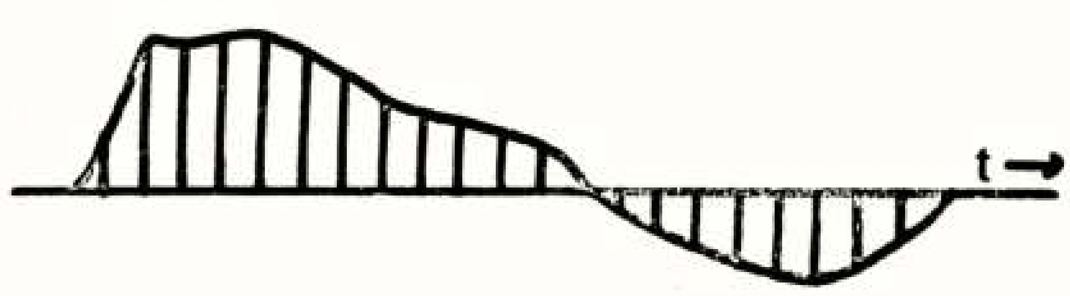


Fig. 7 - Analoog-digitaal omzetting van een golfvorm.

akoestisch instrument, of een kunstmatig geconstrueerde golfvorm wordt in digitale vorm opgeslagen in een dood geheugen (fig.6). Gebruikelijk is de tijdas in een aantal gelijke intervallen in te delen (fig.7) en de bijbehorende amplitude monsters analoog naar digitaal om te zetten. Elk tijdspunt in fig. 7 komt dus overeen met een adres van het r.o.m. Aan de uitgang bevindt zich een digitaal-analoog omzetter, in het eenvoudigste geval een weerstandsnetwerk.

Het geheugen wordt periodiek geadresseerd door een teller, bestuurd door een klok oscillator. De frequentie van het uitgangs signaal wordt direct bepaald door de adresseer snelheid van de teller en daarmee door de klok frequentie. Door toepassing van een stuurbare oscillator zou men elke gewenste toonhoogte kunnen bepalen.

Toonhoogte bepaling, toongetal.

Een betere toonhoogte bepaling, is die, waarbij de adres klok frequentie constant blijft, maar waarbij

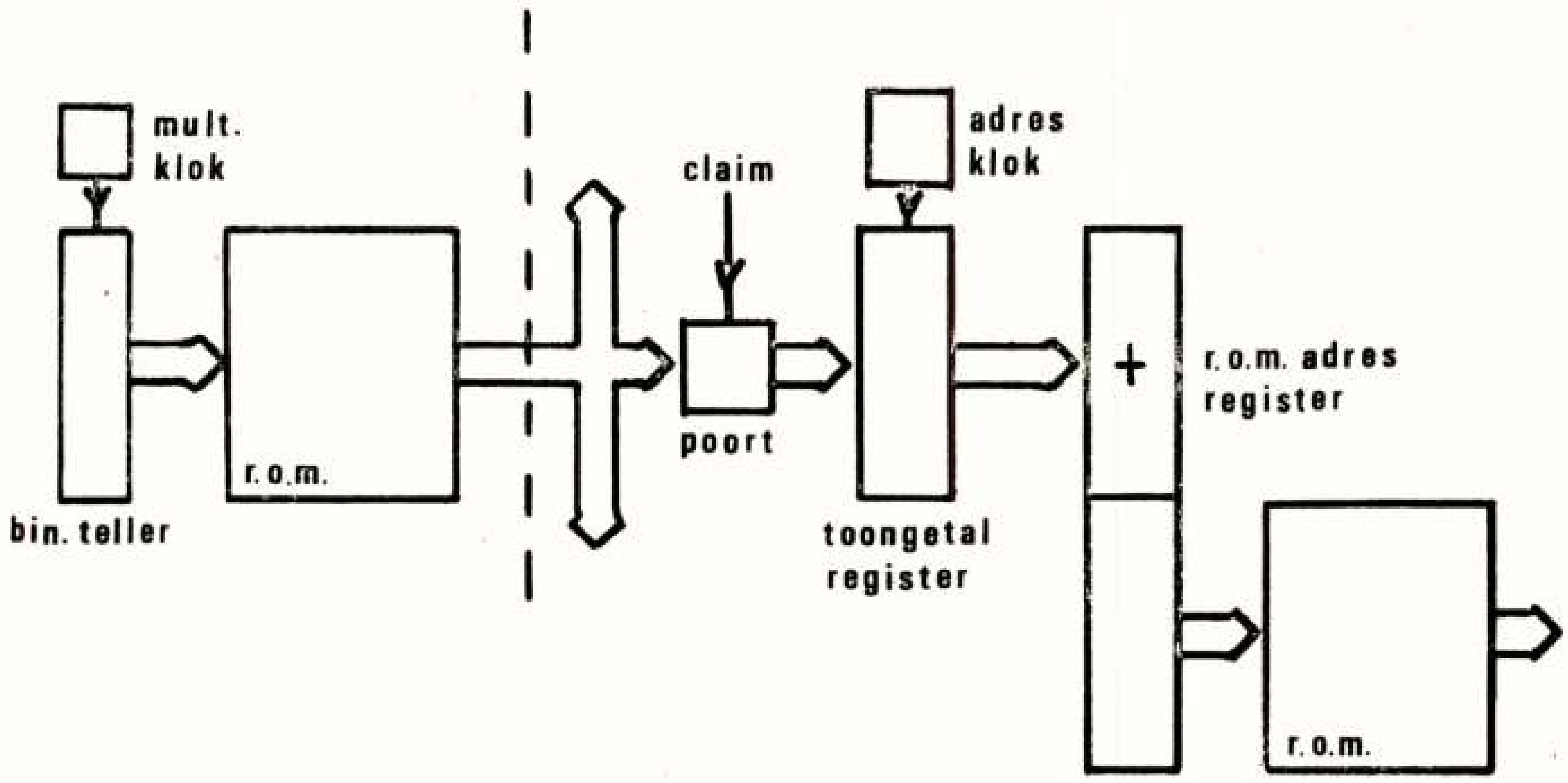


Fig. 8 - Toonhoogte bepaling door middel van een toongetal.

elk geheugen adres gedurende een (variabel) aantal klok perioden geadresseerd wordt (6). Wanneer bijv. elk adres éénmaal per klok periode aangeboden wordt, produceert de generator de hoogste toon, wanneer elk adres gedurende 100 klok perioden wordt aangeboden, is de frequentie een honderdste van de hoogste toon.

Fig. 8 geeft een uitvoering hiervan: aanwezig is een adres register, dat langer is dan het r.o.m. adres formaat, het geheugen wordt geadresseerd door de meest signifikante bits. In een "toongetal" register bevindt zich een getal, dat met regelmaat van de adres klok bij de inhoud van het adres register wordt opgeteld. Is het toongetal klein, dan duurt het lang voordat een signifikant bit verandert, elk adres wordt lang aangeboden, resulterend in een lage frequentie. Hoe groter het toongetal, des te groter de uitgangs frequentie van de generator, in feite is het toongetal evenredig met de gewenste frequentie.

Bepaling van het toongetal.

Het is duidelijk dat bij iedere toets een bepaald toongetal behoort, het verband tussen toets en toongetal kan in binaire vorm door een dood geheugen bepaald worden. Aanwezig is daartoe een binaire teller die synchroon loopt met de toets multiplex teller, de stand van de teller geeft dus op elk moment de binaire codering van de toets die op dat moment "aan de beurt" is. Aan de uitgang van het r.o.m. verschijnt dan het toongetal van deze toets, vastgelegd door de waarheids tabel van het r.o.m. Wanneer een toets wordt ingedrukt en daarna de generator gereserveerd wordt, komt op dat moment een puls uit het toewijzings circuit die een poort even opent, en het toongetal overbrengt in het toongetal register. Het gedeelte links van de stippellijn is gemeenschappelijk voor alle generatoren.

Een andere manier voor de toongetal bepaling geeft figuur 9, gebruik makend van het feit, dat de verhouding van twee opeenvolgende toongetallen gelijk is aan de 12e machtswortel uit 2.

Uitgangspunten zijn:

a. de multiplex cyclus begint bij de laagste toets;
b. bij het begin van de cyclus staat in het register het toongetal van de laagste toets.

Bij elke stap van de multiplexer wordt de inhoud van het register vermenigvuldigd met de 12e machtswortel uit 2 en in het register teruggebracht, op elk moment is nu ook weer het toongetal van de toets die "aan de beurt" is aanwezig.

Figuur 10 tenslotte, geeft een vermenigvuldiger met de 12e machtswortel uit 2, gebruik makend van

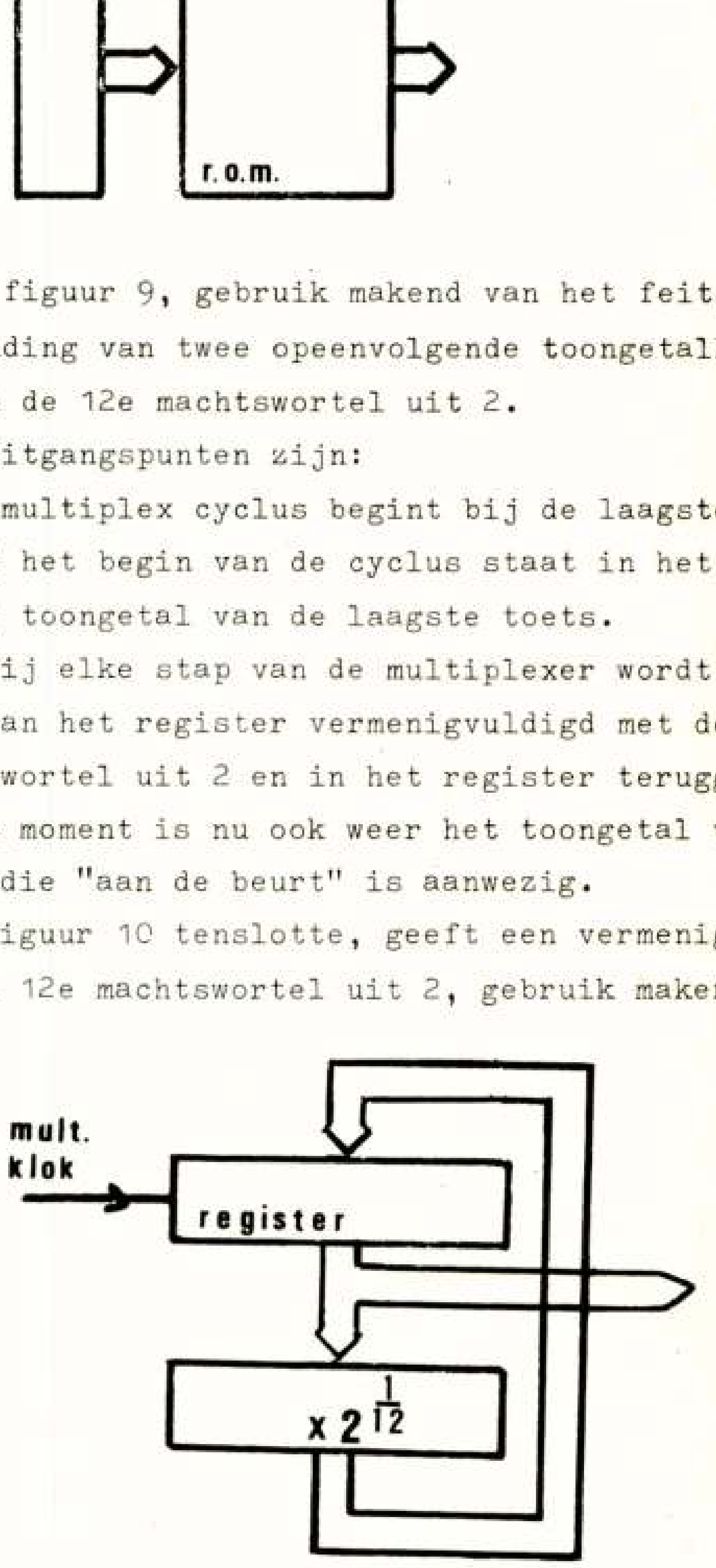


Fig. 9 - Toongetal berekening.

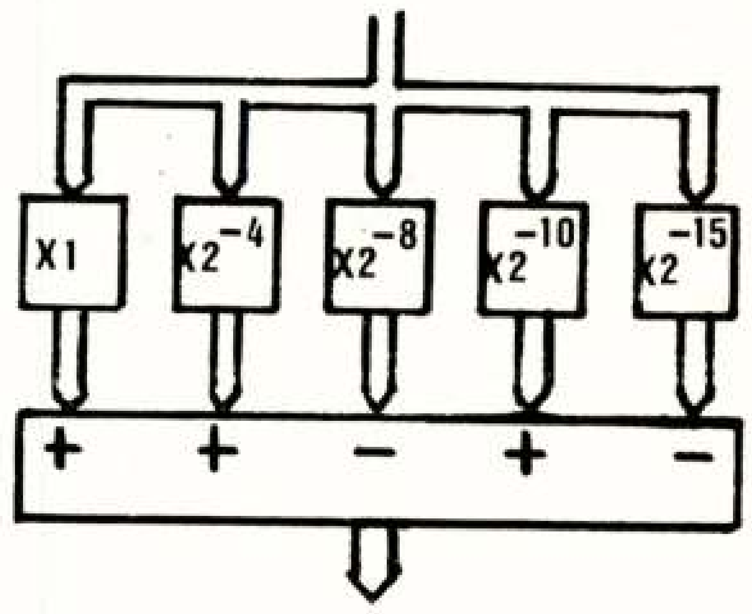


Fig. 10 - Vermenigvuldigen met $2^{\frac{1}{12}}$

het feit, dat deze verhouding goed benaderd wordt door $1 + 2^{-4} - 2^{-8} + 2^{-10} - 2^{-15}$.

CONCLUSIE

Hoewel alle problemen nog niet opgelost zijn (de golfvorm is hier bij elke toonhoogte dezelfde, hetgeen bij akoestische instrumenten niet altijd het geval is) bieden de beschreven methoden goede perspectieven voor de toekomst. Vooral voor een bepaalde groep electronische muziekinstrumenten, de "synthesizers" lijken deze systemen zeer geschikt, en worden reeds gedeeltelijk toegepast.

Voorts zijn in de toekomst structuren denkbaar, waarbij alle bedieningsorganen en alle manipulatie's bij het bespelen van een muziekinstrument in binair gecodeerde vorm aan een micro-computer systeem worden toegevoerd, waarbij het ontwerpen van electronische muziek-instrumenten "soft ware" geworden is. Deze ontwikkeling zal uiteraard afhangen van de prijs ontwikkeling van deze systemen t.o.v. de huidige hard-ware benadering van de ontwerper. Aangezien het bespelen van een muziekinstrument een relatief langzaam proces is, kan de capaciteit van het systeem tegelijkertijd ook benut worden voor automatische bas en ritme begeleiding en andere speelhulpen, die op dit moment nog niet of slechts nauwelijks mogelijk zijn.

Literatuur

1) R.Stapelfeldt, J.A.S.A. vol.46,no.2 ('69)
2) N.V.Franssen,Tijdschrift N.E.R.G.,deel 38,no.1 - ('73)
3) D.Gossel,Philips Technische Rundschau,25,heft 10/11
4) J.H.M.Goddijn,Groot electronisch orgelboek
5) D.Millet,US patent 3.755.609
6) G.A.Watson,US patent 3.743.755

Voordracht gehouden 22 mei 1975 op de Afdeling der Elektrotechniek THT tijdens een gemeenschappelijk symposium van het NERG (werkvergadering nr. 246) en de Benelux section IEEE.

V A R I A

JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND ENGINEERING (J.A.S.E.)
SECTION A: ELECTRICAL POWER AND INFORMATION ENGINEERING.

Het KIvI heeft het initiatief genomen voor de oprichting van een aantal tijdschriften, getiteld "J.A.S.E.".

Een daarvan, section A, "Electrical Power and Information Engineering", is ook voor NERG leden van belang.

In het tijdschrift NERG, deel 39, nr. 5/6, 1974 heeft een eerste aankondiging gestaan van dit nieuwe tijdschrift. Het verschijnt in de Engelse taal en het zal artikelen bevatten die van internationaal belang zijn. Hiermee ontstaat o.a. een nieuwe internationale publikatiemogelijkheid voor Nederlandse auteurs.

JASE-Section A zal 4 x per jaar verschijnen; het eerste nummer wordt eind april 1975 verwacht. Ter kennismaking wordt aan alle Nederlandse elektrotechnische ingenieurs een exemplaar toegezonden, evenals aan alle NERG-leden die niet tot bovengenoemde categorie behoren.

Tussen KIvI en NERG is een overeenkomst gesloten die inhoudt dat het NERG steun verleent aan JASE-Section A bij de acquisitie van copy en bij het samenstellen van de Board of Editors. In ruil voor deze steun kunnen NERG-leden zich op JASE-A abonneren voor dezelfde gereduceerde prijs als KIvI-leden, namelijk f 30,-- per jaar.

NERG-leden die tevens KIvI-lid zijn geven hun abonnement op bij het KIvI; zij ontvangen het tijdschrift door tussenkomst van het KIvI.

NERG-leden die geen lid zijn van het KIvI geven zich voor een abonnement eveneens op bij het KIvI.

Zij ontvangen hun exemplaren echter door tussenkomst van het NERG. Hun abonnement gaat in na storting van het abonnementsgeld op postrekening 94746 ten name van de penningmeester NERG. Wie zich in de loop van 1975 opgeeft als abonné is slechts abonnementsgeld verschuldigd voor de nog te verschijnen exemplaren. Deze abonnementen worden per 1-1-1976 omgezet in jaarabonnementen.

Secretaris NERG.

World Telecommunication Forum
Technical Symposium 6 to 8 October 1975
Palais des Expositions, Geneva, Switserland

Dit Symposium wordt gehouden in verband met Telecom 75, de tweede wereld telecommunicatie tentoonstelling (2 tot 8 october 1975) de ITU wereld plan comité vergadering en de ITU conferentie over golflengte voor lange en middengolfstations in Europa, Azië en Afrika. Men verwacht zowel telecommunicatie ingenieurs als leden van verantwoordelijke administraties. De Secretaris Generaal van de ITU Mr. Mili is beschermheer van het Symposium. Op zijn verzoek nam de directeur van CCIR, Mr. Kirby het voorzitterschap van het Symposium op zich, en prof. Stumpers het voorzitterschap van het programma-comité. Telecommunicatie ingenieurs-verenigingen uit tal van landen ondersteunen het Symposium. IEEE, de Canadese Society CSEE, ITU Association of Japan, New Zeeland Institution NZIE, U.R.S.I., en de meeste bij Eurel aangesloten verenigingen, o.a. IEE, SEE, AEJ, VDE-NTG, SEV, de Finse vereniging.

Het programma comité vergaderde op 26 mei in Genève, en de keuze uit de vele aangeboden abstracts was zeer moeilijk. Besloten werd drie plenaire ochtendzittingen te houden, resp. gewijd aan The world telecommunication network (met veel nadruk op sociale aspecten). Data Communications and Video Services, en Radiocommunication (omroep, satellieten, ruimte onderzoek, radioastronomie, amateur radio, URSI).

In de eerste zitting spreken de bekende franse kernphysicus Leprince-Ringuet, de engelse specialist in alle aspecten van communicatie professor Cherry, de duitse staatssecretaris Elias. In de tweede zitting o.a. dr. Irmer (FTZ), Mr. Haugton (CTCA, Canada), Culbertson (USA), Picard (Parijs) en Larsson (Zweden). In de laatst zitting o.a. Gressmann (EBU), Bruck (AEG-Telefunken), Wheelan (Hughes) Gibson (European Space Agency), van der Laan (Leiden) en Voge (URSI).

De middagvergaderingen hebben over het algemeen een meer spacialistisch karakter. Er zijn telkens vier zittingen in parallel. Zo zien we op maandag naast elkaar: National and regional network development, Optical communication systems, Mobile radio, en Electronic Switching.
Op dinsdag: Integrated Switching and transmission, digital transmission. Computer and data communication. Satellite developments. Wideband radio and cable, digital transmission and processing.
op woensdag: Microwave relay including digital transmission. Nwe video and information services. Terrestinal and space sound and television broadcasting. Miscellaneous later papers.

Onder de ruim honderd auteurs zijn uit Nederland opgemerkt: Van den Kerckhove (Estec), Vitha en Schramel (PTI, Hilversum), Greefkes (TH Eindhoven) van der Wurff Sluyter en Snijder (Philips Res. Labs.), Geluk (Wereldomroep) en van der Laan (Leijden).

Het is de bedoeling de volledige tekst der voordrachten in boekvorm gereed te hebben voor het Symposium begint.

Een meer gedetailleerd voorlopig programma en aanmeldingsformulier is verkrijgbaar bij:

Prof. Dr. F.L. Stumpers
Elzentlaan 11
Eindhoven.

UIT HET NERG

LEDENMUTATIES

Voorgestelde leden

Ir. J.C. Bernouw, Smederij 38, Barendrecht.
Ir. M.H. van Erk, Dammestraat 29, Eindhoven.
Ir. T.L. Jap, Oudraadtweg 25, Delft.
Ir. R.W.P. Kerkenaar, Echternachlaan 484, Eindhoven.
Ir. D.A. Kwee, Geinwijk 728, Amsterdam.
Ir. J.W.P. Molekamp, Kleverlaan 166, Haarlem.
Ir. J.A.F. Oomen, Christoffelkruid 104, Rotterdam.
Ir. P.K. Reek, Gasthuislaan 237, Delft.
Ir. F. Tol, Rietstraat 21, Geldrop.
Ir. E. Weiffenbach, Jan Steenlaan 31, Huizen N.H.

Nieuwe leden

Dr. ir. N.F. Benschop, Schoutstraat 4, Geldrop.
Ir. N.C. Besseling, p/a Piet van Wijngaerdtlaan 46, Abcoude.
Ir. M.C.W. van Buul, Draviklaan 4, Nuenen.
Ir. P. van Dijk, Drossaardstraat 9, Geldrop.
Ir. A.P.K. Elhorst, Kagerstraat 4, Leiden.
Ir. J.J. Gerbrands, Oosteinde 236, Delft.
Ir. W.H. Groeneweg, Rigiblick 521, CH 8913 Ottenbach, Zwitserland.
Ir. W.F.M. Groenewegen, Menelaoslaan 16, Eindhoven.
Ir. R. van Konijnenburg, Waterklaverstraat 17, Lisserbroek, post Lisse.
Ir. F.J.W. Maltha, Boxtelseweg 20, Liempde N.B.
Ir. J.J. Meder, Albertine Agneslaan 406, Vlaardingen.
Ir. F. van der Meer, Wetenschappelijk Instituut P.O. Box 537, Paramaribo, Suriname.
Dr. R.W. Meijer, Burg. Keijzerlaan 168, Leidschendam.
Ir. W.A. Noz, Hogeweg 26 II, Amsterdam.
Ir. J.G. Nijboer, Beneden Beekloop 7, Geldrop.
Ir. H. Ontrop, Amalia van Anhaltstraat 40, Eindhoven.
Ir. J. van der Rhee, Zaadkorrel 1, Eemnes.
Ir. J. van Staalduinen, Jan Luyckenlaan 233, Leiden.
Ir. L. van den Steen, Roelantlaan 297, Geldrop.
Ir. A.J. Verroen, Broekslootkade 131, Rijswijk Z.H.
Ir. A.H. van Vuren, Stokviswegje 6, Culemborg.
Ir. Y.C.M. van der Werf, Koepoortstraat 27, Delft.

Nieuwe adressen van leden

Ir. G.C. Groenendaal, De Speldenmaker 4, Veldhoven.
Ir. L.J.M. Janssen, Brugstraat 12, Limmen N.H.
Dr. ir. J. van Nieuwkoop, Prinsesselaan 12, Apeldoorn.
Ir. S.J. Noteboom, Dennenlaan 9, Hollandsche Rading.
C.M. de Zeeuw, Hollandsdiep 7, Liempde N.B.

Overleden

Prof. ir. W.H. van Zoest, Le Sage ten Broeklaan 43, Eindhoven.

Tijdschrift van het Nederlands Elektronica- en Radiogenootschap

Inhoud

deel 40 - nr. 4 - 1975

druk: HET ZUIDEN Eindhoven